

---

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní rok: 2012/2013

Studijní program B 2341 – Strojírenství

Materiály a technologie  
Zaměření strojírenská metalurgie

## **Sledování plynotvornosti formovacích směsí**

Monitoring gassiness of foundry mixtures

Dobeš Jan  
KSP – SM – B47

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

Vedoucí katedry: prof. Dr.Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 66

Počet tabulek: 4

Počet obrázků: 22

Počet příloh: 2

Datum: 24. 5. 2013



## ANOTACE

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Jan Dobeš

Téma práce: Sledování plynotvornosti formovacích směsí

Číslo BP: KSP – SM – B47

Vedoucí BP: Ing. Jiří Machuta, Ph. D.

### **Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se zabývá sledováním a měřením plynotvornosti formovací směsi. Práce se skládá z teoretické a experimentální části. První, teoretická část, popisuje složení slévárenských směsí, vývinu plynů ve slévárenské formě a metody určování plynotvornosti. Druhá, experimentální část, je zaměřena na popis měřicího přístroje, kalibrace, inovace vedoucí ke zvýšení přesnosti zařízení a proměření plynotvornosti dvou směsí.

### **Abstract:**

This bachelor thesis deals with monitoring and measurement of the mould mixture gassiness. The work is composed by theoretical and experimental parts. First part, theoretical, describes composition of foundry mixtures, generation of gases in foundry form and methods determining of gassiness. Second part, experimental, is directed on describing of measure device, calibration, innovations leading to higher accuracy of this device and measuring the gassiness of two mixtures.



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	<b>Jan D O B E Š</b>
Studijní program	<b>B2341 Strojírenství</b>
Studijní obor	<b>3911R018 Materiály a technologie</b>
Zaměření	<b>Strojírenská metalurgie</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

## **Sledování plynotvornosti formovacích směsí**

### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s pískovými slévárenskými formami, s jejich vlastnostmi (fyzikálními, technologickými) a se složkami, které je tvoří. Seznamte se s zařízením pro měření plynotvornosti KSP TU v Liberci.
2. Prostudujte podklady zaměřené na sledování vlastností pískových forem, resp. pískových formovacích směsí.
3. Proved'te experimentální měření na dodaných vzorcích formovací směsi, které jsou k dispozici spolu s měřicím zařízením na naší katedře.
4. Zhodno'te dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.



## **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....

Jan Dobeš  
Šárovцова Lhota 2  
50781 Šárovцова Lhota





## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za velmi cenné rady a za příkladné vedení po celou dobu tvorby této bakalářské práce. Dále katedře KEZ za zapůjčení kalibračních zařízení a panu Ing. Miroslavu Svobodovi za technickou konzultaci v oboru tlakových senzorů.

V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině a Barboře Komárkové za zvýšenou psychickou podporu při vzniku této práce i po celou dobu studia. Díky patří i všem ostatním, kteří podpořili jakoukoliv měrou vznik této práce.

Jan Dobeš



# OBSAH

<b>OBSAH.....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>2 Teoretická část práce.....</b>	<b>9</b>
2.1 Slévárenské formy a jádra .....	9
2.2 Formovací směsi .....	9
2.2.1 Ostřiva formovacích směsí .....	10
2.2.2 Pojiva formovacích směsí.....	16
2.3 Vlastnosti formovacích směsí .....	25
2.4 Dělení formovacích směsí.....	26
2.5 Plynotvornost slévárenských směsí.....	27
2.5.1 Vývin plynů a par ve slévárenské formě[13].....	27
2.5.2 Průnik vytvořených plynů z formy do taveniny .....	29
2.6 Způsoby stanovení plynotvornosti .....	31
<b>3 Experimentální část práce .....</b>	<b>32</b>
3.1 Charakteristika měřicího zařízení .....	32
3.2 Metodika přípravy vzorků, kalibrace, měření a zpracování dat.....	43
3.3 Charakteristika měřených vzorků .....	52
3.4 Naměřené hodnoty plynotvornosti.....	53
<b>4 Diskuze výsledků.....</b>	<b>59</b>
<b>5 Závěr .....</b>	<b>62</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>64</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>65</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>66</b>



## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

$P_f$	tlak plynů	[Pa]
$P_m$	metalostatický tlak	[Pa]
$P_p$	odpor kovu proti vniknutí bubliny	[Pa]
$P_{pf}$	přetlak plynů nad hladinou taveniny	[Pa]
$V_m$	molekulový objem plynu	[m <sup>3</sup> ·kmol <sup>-1</sup> ]
$m$	hmotnost CaCO <sub>3</sub>	[Kg]
$M_{CaCO_3}$	molární hmotnost CaCO <sub>3</sub>	[Kg·kmol <sup>-1</sup> ]
$K$	přepočtová konstanta	[V·Pa <sup>-1</sup> ]
$dU$	diferenciál napětí	[V]
$dP$	diferenciál tlaku	[Pa]
$K$	přepočtová konstanta	[V·Pa <sup>-1</sup> ]
$U$	naměřené napětí	[V]
$P$	výsledný tlak v peci	[Pa]
$P_z$	tlaková chyba způsobena uzavírací zátkou	[Pa]
$P_a$	atmosférický tlak	[Pa]
$V_0$	objem měřicí soustavy	[cm <sup>3</sup> ]
$\Delta P$	změna tlaku vyvolaná vyvíjenými plyny uvnitř soustavy	[Pa]
$\Delta V$	změna objemu plynu vyvinutých uvnitř soustavy	[cm <sup>3</sup> ]



# 1 ÚVOD

Slévárenství je ve strojírenství základní složkou, jelikož jsou jeho produkty základem všech polotovarů užitých ve strojírenství, tím i dílů z nich vyráběných.

Především automobilový průmysl neustále vyžaduje složitější, přesnější a kvalitnější odlitky, dnes už převážně ze slitin neželezných kovů (např. Al, Mg, Cu, Zn). Proto jde o dynamicky se rozvíjející oblast strojírenství. S tím souvisí i snaha o zkvalitnění formovacích směsí majících přímý vliv na kvalitu i cenu cílového produktu. Nadále tuto oblast formují stále přísnější požadavky na vyšší produktivitu práce, na ekologický dopad technologie a výrobu kvalitních odlitků. Odlitky vyráběné v pískových formovacích směsích mohou být ovlivňovány značnou plynotvorností použitého pojiva.

V dnešní době je k dispozici nepřeborné množství formovacích směsí, avšak pro výrobu určitých typů odlitků je stále velmi důležité zvolit tu nejvhodnější splňující řadu nutných kritérií. Jedním z nich je plynotvornost. Ta nám může poukázat na vhodnost pro výrobu konkrétních odlitků. Měřením plynotvornosti formovacích a jádrových směsí se po dlouhou dobu zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie (KSP), TU v Liberci. K tomuto účelu bylo zde vyvinuto měřicí zařízení, které je i nadále inovováno, modernizováno a zdokonalováno s cílem zvyšovat přesnost za pomoci nejmodernějších měřicích a sledovacích metod.

Také má bakalářská práce, zabývající se sledováním plynotvornosti formovacích směsí, přispěla k další inovaci tohoto měřicího zařízení.



## 2 Teoretická část práce

### 2.1 Slévárenské formy a jádra

Forma je v podstatě nástroj vyrobený z formovací směsi nebo z kovu (tj. ze žáruvzdorných materiálů), jehož dutina svým tvarem vytváří negativ budoucího odlitku. Jádra, kterými se mj. zabývá tato práce, slouží ve formě k vytvoření otvorů a dutin nebo ulehčují formování a skládání formy. Základní rozdělení forem je dle počtu odlití, které na nich může být provedeno. [1]

1. Netrvalé – slouží pro odlití pouze jednoho odlitku. Vyrábí se z formovacích směsí většinou pískových a po odlití a ztuhnutí odlitku se forma zničí. Může být ale použita k výrobě dalších forem. Díky malé akumulaci tepla v nich odlitky tuhnou pomaleji. [2]
2. Polotrvalé - slouží pro odlití až padesáti odlitků, zdaleka nedosahuje životnosti kokil. Bývají často vyrobeny z keramických nebo grafitových žáruvzdorných hmot pēchováním. Forma musí mít větší úkosal a jednoduché tvary. Tím se zabrání poškození při smršťování a vyjímání hotových odlitků. Každá forma se před novým litím musí opravit, a to přesušením anebo vyžiháním. [1]
3. Trvalé – toto je označení pro kovové formy (kokily). Jsou vytvořeny pro vysoké počty odlitků, tedy pro velkosériové výroby. Pro jejich vytvoření se používá litin, ocelí i hliníku. Častými tepelnými cykly se forma tepelně namáhá, což vede ke vzniku mapování, vytavování, deformací a prasklinám. Při vzniku lehkých závad lze formu opravit návary a zabroušením, při vážnějším poškození (praskliny) je forma vyřazena. Podmínkou použití kovových forem je, že teplota odlévání taveniny musí být nižší, než je teplota tání materiálu, z něhož je vyrobena forma. Tyto formy jsou velmi dobrými akumulátory tepla, proto dochází k rychlému tuhnutí odlitků. V dnešní době jsou tyto formy čím dál více používané, především pro možnost vysoko i nízkotlakého lití, to znamená k tvorbě odlitků s tenkými stěnami a složitými tvary. [2]

### 2.2 Formovací směsi

Formovací směs je polydisperzní třífázová soustava, jejíž vlastnosti závisí na vlastnostech všech tří fází – tuhé, kapalně a plynně. Částice různých velikostí



a tvarů tvoří tuhou fázi a nazývají se ostřivo. Ty určují a tvoří kostru celé soustavy. V mezerách mezi tuhými částicemi je uzavřena fáze kapalná, to jsou zejména pojiva a voda. Další fází je fáze plynná, tedy vzduch. [3]

Formovací směs se skládá ze 2 základních složek, a to z ostřiva a pojiva. Dále směs může obsahovat plastifikátory (vodu, alkoholy) a také přísady. To jsou látky, které příznivě ovlivňují vlastnosti směsi při styku s taveninou nebo po ztuhnutí odlitku. Například jde o piliny, které po vyhoření zvyšují prodyšnost formy. [1]

## 2.2.1 Ostřiva formovacích směsí

Souhrn písků, jejichž zrna jsou větší než 0,02mm, označuje ČSN 72 1531 jako ostřiva formovací směsi. Ve formovací směsi se vyskytuje ve většinovém podílu od 78% do 98% z celkové hmotnosti. Jeho vlastnosti určuje především mineralogické složení, tvar, velikost a granulometrická skladba zrn. Základní rozdělení je podle původu:

1. přirozené (křemenné a zirkonové písky, olivín)
2. umělé (šamotový lupek, elektrokorund, kovová ostřiva)

Dále se mohou dělit podle chemické povahy:

### 1. kyselé (křemenné písky)

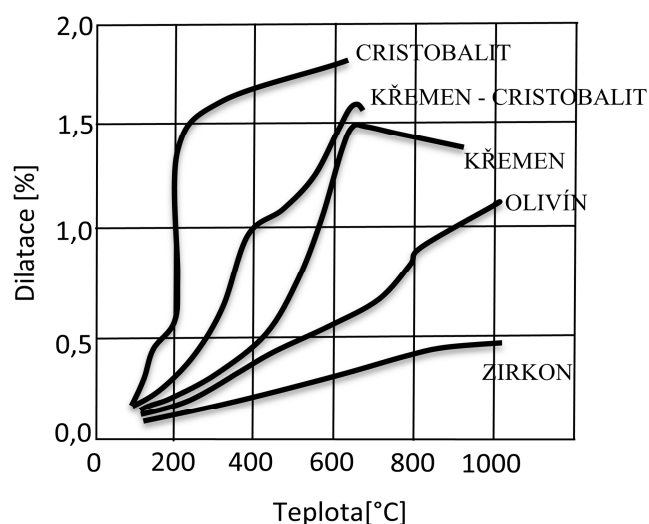
Základním ostřivem kyselého charakteru se nalézá ve formě křemičitých písků. Jde o  $\text{SiO}_2$ , tedy oxid křemičitý. Může se vyskytovat v několika krystalických a jedné amorfnní formě. Polymorfie  $\text{SiO}_2$  má složitý charakter, jelikož v některých tepelných oblastech může existovat v několika modifikacích.

$\alpha$ -křemen	1025 °C →			$\alpha$ -cristobalit		
	870 °C →	$\alpha$ - tridymit	1470 °C →		1710 °C →	Tavenina $\text{SiO}_2$
↑ 573 °C		↑ 163 °C		↑ 180 °C-270 °C		↑
$\beta$ -křemen		$\beta$ -tridymit				
		↑ 117 °C		$\beta$ -cristobalit		Křemenné sklo
		$\gamma$ -tridymit				

**Obr. 2-1 Schéma polymorfních modifikací křemene. [1]**



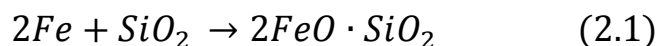
V obr. 2-1 jsou vodorovnými šipkami značeny směry přeměn, probíhajících velmi pomalu, za zvláštních podmínek a jsou nevratné. Svislé šipky označují rychlé přeměny, které probíhají při rychlém ohřevu či ochlazení. Z hlediska formy a formovací směsi je nejzávažnější změna křemene  $\beta$  na křemen  $\alpha$ . Ta se projevuje roztahováním zrn při ohřevu povrchových vrstev formy, jejím praskáním a odlupováním.



**Obr. 2-2 Závislost tepelné dilatace na teplotě [1]**

Křemičité písky také obsahují řadu minerálů, které mohou škodlivě působit na vlastnosti formovací směsi. Jde např. o živec, slídu a uhličitany, které způsobí spékání směsi a zhoršují tím kvalitu odlitku. Obsah těchto minerálů by proto neměl být vyšší jak 3%. [3,4]

Křemen, základní složka, je vysloveně kyselý. Proto reaguje se zásaditými látkami obsaženými v tavenině. Tyto reakce jsou pak příčinou snížené žáruvzdornosti, protože vznikají nízkotavitelné sloučeniny. Níže je popsána chemická rovnice (2.1) vzniku fayalitu, jenž je příčinou zapečení díky své nízké žáruvzdornosti ( $t_{\text{tání}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



## 2. neutrální (šamot, chromid, zirkon, korund a další)

### a) Šamotová ostřiva

Nejpoužívanějším ostřivem neutrálního charakteru je šamot. Je to vypálený žáruvzdorný jíla s podílem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vyšším než 30% (plavené kaolíny dosahují až 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), zbytek směsi je  $\text{SiO}_2$ . Příměsi jiných oxidů jsou považovány za znečišťující příměsi a jejich podíl závisí na čistotě výchozí suroviny. Šamotové ostřivo je velmi vhodné pro těžké ocelové a litinové odlitky ze šedé litiny. Do formovací směsi volíme šamot středně žáruvzdorný ( $t_{\text{tání}} = 1730\text{ }^\circ\text{C}$ ) běžného chemického složení, a to o velikosti zrna maximálně 3-5mm. Rozdělení zrnitosti se dělá tak, aby součtová křivka obsahovala částice všech velikostí. Formovací směs neprodělavá polymorfní přeměny a není náchylná k tvorbě záclupů. [3]

### b) Korundová ostřiva

Dalším neutrálním ostřivem je korund. V přírodě se vyskytuje jako minerál safír a korund, ve slévárenství se ale používá tzv. elektrokorund, který je uměle vyráběn. Jde o oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jež obsahuje asi 53% Al. Vyskytuje se celkem ve čtyřech modifikacích, ve většině literatury se ale objevují pouze modifikace  $\alpha$  a  $\gamma$ .

$\alpha$ -korund – krystalizuje v šesterečné soustavě, je to vysokoteplotní modifikace vznikající z korundu  $\gamma$  při cca  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Je nerozpustný v kyselinách a hustota je přibližně  $4000\text{ [Kg.m}^{-3}\text{]}$ .

$\gamma$ -korund – krystalizuje v krychlové soustavě a při teplotách nad  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  překrystalizuje v  $\alpha$ -korund. Hustota je  $3647\text{ [Kg.m}^{-3}\text{]}$ .

Z nich je nejpoužívanější  $\alpha$ -korund ( $t_{\text{tání}} = 2050\text{ }^\circ\text{C}$ ) pro jeho netečnost k oxidům železa. Používá se pro přípravu směsí jílových, s vodním sklem ale i s organickými pojivy. [1]

### c) Olivínová ostřiva

Jde o materiál sopečného původu, chemickým složením je to tuhý roztok forsteritu ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $t_{\text{tání}} = 1900\text{ }^\circ\text{C}$ ) a fayalitu ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ,  $t_{\text{tání}} = 1205\text{ }^\circ\text{C}$ ) v poměru  $96\% \text{ Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\% \text{ Fe}_2\text{SiO}_4 = (\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ . Toto ostřivo je zelené barvy, tvrdost dle Mohra stupně 7, hustoty přibližně  $3200\text{ [Kg.m}^{-3}\text{]}$  a teploty





tání -  $t_{\text{tání}} = 1870\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ta je ovlivněna poměrem dílčích složek (fayalit-forsterit). V přítomnosti křemenného písku se teplota tání výrazně snižuje. Výhodou tohoto ostřiva je téměř plynulá dilatace, navíc nižší než u křemene. Nevýhodou je vysoká plynotvornost. [1]

Vhodné je především pro lití manganových ocelí, pro všechny technologie mimo směsi s furanovou pryskyřicí a technologii Hot-Box, kdy tyto směsi nedosahují požadovaných pevností. Odlitky mají čistý povrch, který vyžaduje minimální náklady na apretaci.[5]

#### d) Magnolitová ostřiva

Vyrábí se slinováním dunitu při teplotách kolem  $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dunit je podobný složením olivínu, avšak proti olivínu obsahuje ještě složky  $\text{CaO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Zrna mají nepravidelný tvar a porézní povrch. Ostřivo dovoluje výrobu Mn ocelí s vysokou jakostí povrchu.[6]

#### e) Zirkonová ostřiva

Základem je směs silikátů zirkonu ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ ) a oxidů zirkonu ( $\text{ZrO}_2$ ). Složení silikátu je v poměru 67%  $\text{ZrO}_2$  a 33%  $\text{SiO}_2$ , přičemž kvalita roste s vyšším podílem  $\text{ZrO}_2$ . Zrna zirkonových písků mají ideálně kulatý tvar, dosahují tedy vysokých pevností. Důsledkem je možnost snížit dávkování pojiva směsi. V porovnání s křemenným ostřivem je zde nižší lineární roztažnost (nejnižší z přírodních písků) a vyšší chemická stabilita vůči oxidům železa. Mají dvakrát vyšší tepelnou vodivost než křemenná ostřiva, jsou též velmi odolná proti tvorbě zálpů a zapékání povrchu odlitků. Teplota tání -  $t_{\text{tání}} = 2550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tvrdost dle Mohrovy stupnice 7,5. Ostřivo lze pojit všemi druhy pojiv. Pro vysokou cenu se používá pouze k výrobě keramických břechek a pro slévárenské nátěry.[1]

#### f) Chromitová ostřiva

Tyto ostřiva představují tuhý roztok několika mineralogických složek. Jde především o magnesiochromit ( $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), spinel ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), hercinit ( $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) a magnezioferit ( $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Tuhým roztokem je chromit ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  neboli  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ). Ve slévárenství se používají chromidy s nízkým obsahem chrómu (tzv. keramické chromidy), ty se označují jako metalurgické.



Obsahem jde o až 48% podíl  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  s maximálně 12% Fe. Důležité je také sledovat obsah  $\text{SiO}_2$  (ať už ve formě silikátů nebo volného křemene) – pro masivní ocelové odlitky by celkový obsah neměl překročit 2-2,5%. Hustota je  $4650[\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ , tvrdost podle Mohra 5,5 a teplota tání -  $t_{\text{tání}} = 2180^\circ\text{C}$ . Je vhodné pro lití těžkých ocelových odlitků (i Mn ocelí), ať už legovaných nebo uhlíkových. Používá se též pro ochlazování tepelných uzlů, protože umožňují intenzivní odvod tepla. Má vysokou odolnost proti zapékání odlitků.[1]

Mezi přírodními nekřemennými ostřivy má nejvyšší ochlazovací schopnost a je velmi dobře regenerovatelný magnetickou metodou. Oproti zirkonovému písku má hranatý tvar zrn, z čehož plynou jeho odlišné pevnostní a technologické vlastnosti. Je používán zejména pro přípravu samotvrdnoucích směsí, směsí s vodním sklem a metodu Cold-Box. [5]

### 3. zásaditá (magnezit, chrommagnezit)

#### a) Magnezit

Chemicky jde o  $\text{MgO}$ , uměle připravené ostřivo pálením a slinováním (tak se označuje metoda stlačování kovového prášku ve formě za vysokých teplot, v tomto případě při teplotě  $1400^\circ\text{C}$ ). Teplota tání čistého oxidu hořečnatého je přes  $2800^\circ\text{C}$ , jsou tedy vysoce žáruvzdorné. Tvrdost dle Mohra dosahuje hodnoty 4, hustota je přibližně  $3030 [\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ . Krystalizuje v triagonální soustavě. Tyto směsi obsahují 85%  $\text{MgO}$ , dále jako příměsi ještě vápenaté, křemičité i železité sloučeniny. Jsou velmi náchylné na prudké tepelné přechody. Používá se pro odlévání těžkých manganových ocelí nebo pro vyzdívání tavicích pecí.[1,3,4]

#### b) Chrommagnezit

Složení směsi při 35%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  a 65%  $\text{MgO}$  dosahuje nejlepší odolnosti proti ostrým tepelným přechodům. Chrommagnezitové ostřivo se používá do vysoce kvalitních směsí pro speciálně legované oceli, nebo pro vyzdívání tzv. černé klenby.[4]



### c) Magnezitchrom

Tato ostřiva jsou charakterizována vysokými hodnotami tepelných vodivostí, vyšší hustotou a nízkou teplotní roztažností. Nejčastěji se pro ně používá pojení pomocí vodního skla (CT směsi s CrMg ostřivem), nelze je pojít pomocí pryskyřic tvrditelných pomocí kyselých katalyzátorů. Pro vysoké odolnosti vůči zapékání a zálupům vytlačily šamotové směsi. Velmi vhodné jsou pro lití těžkých odlitků z Mn ocelí.[1]

V této problematice se vyskytují i tzv. speciální ostřiva. Ta lze shrnout v následujícím rozboru

### a) Kovová ostřiva

Používají se pro svou schopnost vysoké tepelné vodivosti (rychlejší tuhnutí odlitku). Jde většinou o tříděný odpad ze slévárenských tryskačů, nebo se používají přímo litinové/ocelové broky. Velikou výhodou je snadná regenerace s konstantními vlastnostmi. Pro tato ostřiva se dá použít magnetické formování (viz pojiva). Kvůli vysoké smáčivosti kovových broků je nutné opatřit dutiny forem nátěry. Zrnitost se pohybuje mezi 0,1 – 0,5 mm.[1]

### b) Grafitová ostřiva

Tato ostřiva se vyskytují pouze ojediněle. Pro použití se doporučuje přírodní vločkový grafit bez přídavných materiálů. Vyznačují se vyšší tepelnou vodivostí, korozní a chemickou stálostí, nesmáčivostí, velmi vysokou žáruvzdorností a odolností proti opotřebení kovem a struskou. Trpí malou pevností, neprodyšností. Při použití je nutné chránit formy před stykem se vzduchem po dosažení teploty vyšší, než je oxidační bod (451 °C). Při nedodržení této podmínky dojde k vyhoření grafitu. Ostřivo se hodí pro polotrvalé formy pro odlévání slitin s vysokými teplotami tavení, jako je například titan. Naprosto nevhodné jsou pro použití se slitinami, kdy hrozí difuze uhlíku do odlitku. Povrch odlitků má vysokou jakost a rozměrovou přesnost. [1]

### c) Keramická ostřiva

Ostřiva umělého původu, vysoké žáruvzdornosti ( $t_{\text{tání}} = 1825\text{ °C}$ ) a malé tepelné dilatace. Složením jde o směs 84% mullitu, 14% skelného pojiva a 2%



korundu. Ideálně kulovitý tvar dovoluje použití menšího množství pojiva. Jako pojiva se užívá bentonitu, vodního skla či pryskyřic. [1]

d) Serpentinová ostřiva

Speciální ostřiva pro použití na formy a jádra austenitických ocelí s magnezitovým nátěrem. Žíhaný serpentín se používá jako náhrada olivínových písků. Obsahuje přibližně 40% MgO, 47% SiO<sub>2</sub>, 13% FeO+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. [6]

## 2.2.2 Pojiva formovacích směsí

Vedle ostřiva jsou další nezbytnou složkou formovací směsi pojiva. Ta vytváří ve směsích vazby mezi jednotlivými zrny ostřiva. Tyto vazby mohou působit buď zasyrova nebo po vnějším chemickém či fyzikálním zásahu. Vazba pojiva a ostřiva je určena velikostí adhezních sil (mezifázové síly mezi atomy a molekulami v povrchových vrstvách) a kohezními silami (síly vzájemného působení mezi stejnorodými atomy a molekulami). Charakter sil je definován chemickofyzikálními vlastnostmi druhu pojiv a stavem povrchu. [3], [7]

Starším rozdělením slévárenských pojiv je dle jejich původu na:

### 1. *anorganická pojiva*

Pojiva minerálního původu, udělující směsi vaznost za syrova nebo se vytvrzují po fyzikálním/chemickém zpevnění. Mají některé společné vlastnosti, např.: vhodnost pro lití za syrova, nízká plynatvornost, špatná rozpadovost a nevyhořívají. Patří sem např.: jíly, cement, sádra, vodní sklo. [3]

### 2. *organická pojiva*

Sem lze zařadit např.: pryskyřice, oleje, sacharidy, bitumeny a jiné organické produkty. I tyto směsi mají podobné vlastnosti. Mezi ně patří: možnost řízeného tepelného/chemického ztužení, dobrá tekutost za syrova, vysoká plynatvornost, tepelná destrukce a vyhořívání, dobrá rozpadovost a z toho plynoucí snadné čištění odlitků. V neposlední řadě je nutné zdůraznit zdravotní závadnost téměř všech organických pojiv, proto je nutné s nimi pracovat velmi obezřetně. [3]



Novější rozdělení respektuje časovou osu vývinu různých generací pojivových systémů, a to na I II III a IV generaci:

### **1. Pojiva I. generace**

Jílová pojiva stále patří k nejrozšířenějším slévárenským druhům pojiv. Jsou obsažena v přírodních píscích, používá se jich i k pojení praných písků nebo i umělých ostřiv. Mají dobré technologické i hygienické vlastnosti, jsou ekonomicky dostupné, mají dobrou pevnost po vysušení, dostatečnou vaznost a jejich likvidace není z ekologického hlediska náročná. [7]

Zde vaznost a pevnost směsi určují kapilární síly, Van der Waalsovy síly a adhezně-kohezní síly pojiva. Mechanickým způsobem pojení se myslí např.: pěchování střešování lisování vstřelování atp. Do této skupiny patří jílová pojiva, přírodní písky, syntetická a bentonitová pojiva. [1]

#### **a) Kaolinitické jíly**

Kaolinit, chemickým složením  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , je hlavní součástí horniny kaolínu a žáruvzdorných jíků. Plavením těchto surových kaolínů se získávají plavené kaolíny o obsahu až 90% kaolinitu. Zbytek jsou příměsi křemene, živce, slídy aj. V kombinaci se šamotovým lupkem tvoří šamotovou formovací směs. Ta je nejvhodnější pro výrobu forem a jader masivních ocelových odlitků. Jedná se o směs na sušení, které se vypalují při 650 °C, kdy dochází k dehydroxylaci jíků. Ze všech jíků mají nejmenší bobtnavost a nejvyšší žáruvzdornost. Ve slévárnách se často používá kaolinitických jíků jako pojiva pro výrobu dusacích hmot pro opravu licích pánví a kuploven. [1], [2], [3]

#### **b) Illitické jíly**

Tyto jíly velmi často doprovází přírodní písky. Nejhlavnějším z těchto jíků je glaukonit, jenž je tvořen malými krystalky zelené barvy. Přírodní písky jej obsahují pouze z asi 12-15%. Jedná se o jíl s 20-25% železa. Po dokonalém rozetření je velmi plastický a ve formovacích směsích dosahuje vysokých vazností. Spékavost je kolem teplot 1300-1350 °C. Díky této vlastnosti se vytvoří na lici formy tenkou spečenou vrstvu formovacího materiálu a zabrání se tím rozplavování. V tom důsledku se velmi snadno odlupuje



z odlitků. Pro svou dobrou bobtnavost i žáruvzdornost se užívá pro odlévání těžkých litinových odlitků. [1], [7]

c) Montmorillonitické jíly

Je-li hlavní složka montmorillonit (chemicky  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) obsažena alespoň ze 75%, nazývají se tyto jíly bentonity. V současné době jde o nejrozšířenější jílové pojivo. Slouží k výrobě tzv. Bentonitových směsí. Tyto směsi vynikají vlastnostmi jako je výborná plastičnost, adsorpční schopnosti, možnost dosáhnout tixotropních stavů, ale hlavně mají téměř 3x vyšší pojivovou schopnost než kaolinitické jíly. To umožňuje 3x snížit množství pojiva ve směsi. To že je ve směsi menší obsah jílu znamená i menší obsah vody, což umožňuje lití do těchto forem na syrovo. Proto se tyto směsi hodí i pro strojní formování na automatických linkách. Navíc je toto pojivo ekonomicky dostupné, ekologicky nezávadné a umožňuje snadnou regenerovatelnost ostřiva za sucha i za mokra. Jsou-li navíc tyto jíly natrifikovány (výměna iontů  $\text{Ca}^{2+}$  za ionty  $\text{Na}^{2+}$ ), zvýší se tím podstatně odolnost formovací směsi proti zálupům.

## 2. *Pojiva II. generace*

Pojivem je zde chemická látka, která v důsledku chemických reakcí (oxidace, dehydratace, adice, polykondenzace) zajistí vaznost. Do této skupiny lze zařadit dvě podskupiny, a to organická (alkalické silikáty, koloidní silikáty, cementy, sádry) a anorganická (přírodní oleje, sacharidy, umělé pryskyřice).

### a) **Organická**

#### 1. Olejová pojiva

Oleje (fermeže) jsou estery nenasytných mastných kyselin, které tuhnou oxidací. Jsou ve vodě nerozpustné, a jsou zařazeny mezi organická pojiva. Za syrova mají tato pojiva nízkou vaznost ale velmi dobrou tekutost. Oxidace a sušení probíhá v teplotách od 230 °C až do 250 °C po dobu 2 až 5 hodin. Jde o velmi neproduktivní metodu výroby forem, a proto dnes ustupuje do pozadí. [1], [4]



## 2. Sacharidová pojiva [1], [2], [4]

Jde o látky ve vodě rozpustné, proto může být při mísení přítomna vlhkost. Mají velmi dobrou vaznost za syrova, rozpadavost po odlití a vysokou tekutost. Jejich nevýhodou je ale přejímání atmosférické vlhkosti. Po vysušení jsou značně pevné, proto se užívají často k výrobě jader. Základní sacharidová pojiva lze shrnout v následujícím rozboru:

### a) Glukopren

Je to technický roztok glukózy upraven přidáním síranu amonného. Jde o mírně nahnědlou kapalinu s  $\text{pH} = 5,5$ . Vhodný je především pro výrobu jader vstřelováním a pro metody Hot-Box nebo sušení. Taky jej lze použít jako náhradu dextrinu do bentonitových směsí.

### b) Melasa

Je to odpad vzniklý výrobou cukru z cukrové řepy. Obsahuje až 50% sacharózy, 20% vody a zbytek jsou alkalické soli. Tyto soli způsobují značnou navlhavost, tedy zadržování atmosférické vlhkosti. To se projeví především zvýšenou plynotvorností. Toto pojivo při dlouhodobém skladování kvasí. To lze omezit přidáním  $\text{CH}_2\text{O}$

### c) Dextronér

Jde též o odpad při výrobě glukózy. Při vysušení na teplotu  $210^\circ\text{C}$  se zlepšují mechanické vlastnosti. Pro dlouhodobější skladování se musí stabilizovat glukóza, aby nedocházelo jejímu vylučování. To se provádí přidáváním cca 8%  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Tato pojiva se užívala pro metody vytvrzování Hot-Box.

### d) Polysacharidy (škroby)

Jedná se o látky, které se při hydrolýze rozpadají minerálními kyselinami na monosacharidy. Většina tvoří ve sloučení s vodou koloidní roztoky – škroby.

Škroby jsou bílé prášky, značně hygroscopické. Běžný škrob mívá do 20%  $\text{H}_2\text{O}$ , ta se odstraňuje opatrným sušením. Ve studené vodě jsou téměř nerozpustné, v teplé bobtná a vzniká vysoce viskózní roztok, který po ochlazení vytvoří tzv. škrobový maz. Těchto škrobů se používá jako



pojiva málo. Častěji se aplikuje ve formě dextrinu jako příměs pro zlepšení vlastností (spěchovatelnost, plastičnost, houževnatost) formovací směsi.

### 3. Pryskyřice [1], [2]

Tuto skupinu tvoří látky, které jsou nenavlhavé, ve vodě nerozpustné. Po vytvrzení jde o tepelně nevratné hmoty. Vlastnosti pryskyřic se liší použitým druhem pryskyřic a na účelu směsí. Většina pryskyřic je toxická, proto je třeba dbát na ochranu zdraví. Pojící vlastnosti pryskyřic jsou velmi dobré. Dnes není neobvyklé, že ve formovací směsi je pouze 1% pojiva. Z hlediska chemické povahy jde o zásadité prvky.

Základní rozdělení je na:

- a) Pryskyřice vytvrditelné teplem
- b) Pryskyřice vytvrditelné pomocí katalyzátorů

Dělení dle původu polykondenzací:

- a) Fenolické pryskyřice

Pryskyřice známé též jako fenoplasty, se vyrábí polykondenzací fenolů. Polykondenzuje-li fenol a formaldehyd v kyselém prostředí za přítomnosti katalyzátoru (hexametylentetramin) a tepla, jde o užití pryskyřic pro metodu dle Croninga, dle které se vyrábí skořepinové formy a jádra. Polykondenzuje-li fenol a formaldehyd v zásaditém prostředí za působení tepla a kyseliny, jde o použití pryskyřic pro metody typu Hot-Box a Warm-Box. Polykondenzuje-li fenol a formaldehyd v zásaditém prostředí pouze za použití kyseliny, je pryskyřice použita pro metody Cold-Box.

- b) Furanové pryskyřice

Pro přípravu se používá derivátu furanu (fural). Ten je obsažen v dehtu ze dřeva jehličnatých stromů, slámy nebo kukuřičných palic. Pro potřeby slévárenství se používají tři typy pryskyřic, a to furanové, furaminoaldehydové (VITRESIT SL) a furanketonalydehydové (VITRESIT O). Furanové pryskyřice se klasifikují podle obsahu dusíku a vody. U samotvrdnoucích směsí probíhá polykondenzace za působení





kyselých katalyzátorů. Tato reakce při vytvrzování způsobuje ohřev a vznik vody. Postup vytvrzování probíhá z povrchu dovnitř jader a dochází zde ke změně barvy z bílé přes tmavě zelenou do černé. Používají se pro technologie Hot-Box, samotvrdnoucí směsi s katalyzátorem nebo s ovládaným ztužováním. Kvůli povaze katalyzátorů nelze pracovat s alkalickými ostřivy.

#### c) Močovinoformaldehydové pryskyřice

Vznikají polykondenzací ve slabě kyselém prostředí z jedné molekuly močoviny a dvou molekul formaldehydu za působení tepla. Pryskyřice mohou být modifikovány. Rozhodující vliv má pH celé soustavy a délka trvání reakce.

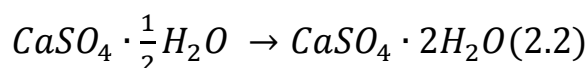
Použití modifikovaných pryskyřic má své omezení. Při rozpadu po odlití se uvolňuje dráždivý zápach. Termodestrukce za nízkých teplot způsobuje uvolňování dusíku a to vede při kontaktu s litinou s kuličkovým grafitem či ocelí ke vzniku bodlin.

Vhodné jsou tedy především na odlévání neželezných kovů, vynikají taktéž velmi dobrou regenerovatelností.

### b) Anorganická

#### 1. Sádrová pojiva

Nejde ani tak o samotná pojiva, jako o formovací směsi. Do sádrových formovacích směsí se nepřidává téměř žádné ostřivo. Smícháním sádry a vody vznikne sádrová břečka. Ta po ztuhnutí utvoří kompaktní sádrovou formu. Vytuhnutí sádrové břečky popisuje rovnice 2.2.



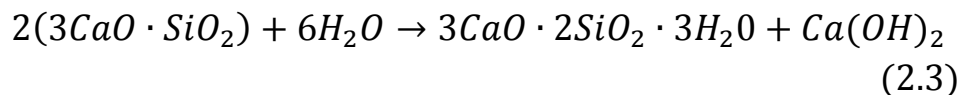
V praxi se běžně přidává k dosažení optimální viskozity více vody, než je uvedeno v rovnici. Obsah vody se udává tzv. vodním poměrem. Ten se běžně pohybuje kolem 0,7 až 0,85. Tyto formy jsou velmi neprodyšné. Pro zvýšení prodyšnosti se často přidávají aktivní látky (bromid amonný), které v břečce utvoří bublinky a ty zvyšují prodyšnost. Další možností je chlazení formy ve vlhké atmosféře, napěňování směsi atd.

Formy je nutné po ztuhnutí sušit (cca 200 °C) a žíhat (cca 450 °C). [1], [4]



## 2. Cementová pojiva [1], [4]

Jedná se o nejstarší pojivové systémy. V běžných cementových směsích se vyskytuje asi 80 dílů křemenného ostřiva, 12 dílů cementu a zbytek směsi tvoří voda. Cement tvoří, podobně jako sádra, hydratační pojivo. To tuhne dle následující rovnice 2.3.



Hydratace zde probíhá v celém objemu. V dnešní době se používají směsi cementu melasou, která zvyšuje plasticitu a zrychluje vytvrzení směsi na polovinu času. Velikou výhodou je, že směsi s tímto pojivem při styku s roztaveným kovem neuvolňuje téměř žádné plyny. Využití nachází především při lití velmi těžkých odlitků. Další výhodou je, že směsi tuhnou na volné atmosféře a tak je není třeba komplikovaně sušit. Mezi velké nevýhody se řadí skutečnost, že cementy tuhnou velmi dlouho.

## 3. Etylsilikátová pojiva[1]

Jde o organický ester kyseliny křemičité. Nejčastěji se používá pro výrobu keramických forem pomocí vytavitelného modelu. Vytvrzení funguje na bázi samovolného rozkladu etylsilikátu. Lze jej urychlit přidáním čpavku či kyseliny solné. Dehydratací gelu kyseliny polykřemičité vzniká amorfni vrstva  $SiO_2$ , která po vypálení při teplotách kolem  $1000^\circ C$  přechází na krystalickou formu  $SiO_2$ .

## 4. Pojivové systémy na bázi Vodního skla

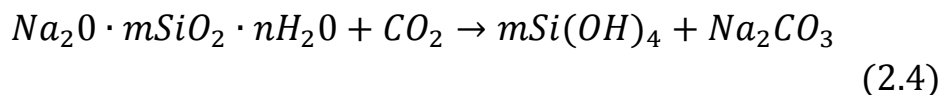
Tyto systémy se v dnešní době, s ohledem na dnešní ekologické požadavky, používají stále častěji. V základu mohou být rozděleny do dvou skupin, a to na ovládaně ztužované (vytvrzované z vnějšku) a samotvrdnoucí směsi. [7]

### a) CT směsi

Jde o pojivový systém vodní sklo –  $CO_2$ . Křemičité ostřivo s vodním sklem se upěchuje do rámu a profoukne se oxidem uhličitým.  $CO_2$  vysuší vodní sklo a přivede jej do kyselé rosolovité formy. Tím vzniká gel kyseliny křemičité a ten postupně přechází v kompaktní



hmotu. Dosáhne pevnosti v tlaku až 1 MPa. Jako vedlejší produkt vzniká soda. Ta se při vyšších teplotách rozkládá na plyn  $\text{Na}_2\text{O}$ , což může způsobit naplynění taveniny. Celou reakci vytvrzení je možné zjednodušit do následující rovnice 2.4.



Tyto systémy se v původní verzi vyznačovali velmi špatnou vazností za syrova (časová prodleva mezi vytažením modelu z formy a vytvrzením pomocí  $\text{CO}_2$ ). Proto se později zavedlo (fy. Allens-Sheffield) použití upraveného vodního skla (modul 2) s přísadou sacharózy. Další experimenty s přidáváním jílových pojiv vedly ke snížení pevnosti pro vytvrzení, proto se nadále nepoužívaly. Pro špatnou rozpadovost tohoto systému se přidávají příměsi ovlivňující zbytkovou pevnost směsi po odlití.

Reaktivita křemenných ostřiv s oxidy kovů v přítomnosti alkalického křemičitanu byla důvodem k rozvoji dalších směsí, tentokrát však již na bázi nekřemenných ostřiv jako jsou chrommagnezitová, zirkonová, chromitová, olivínová atp. (viz 2.2.1 Ostřiva formovacích směsí). [7]

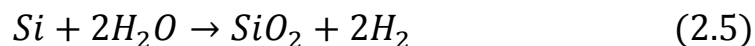
#### b) ST směsi

Jsou to směsi s vodním sklem bez ovládaného ztužování. Jsou vývojově mladší, vytvrzování probíhá na jiném chemicko-fyzikálním principu. Reakce vytvrzování probíhá buď za přítomnosti citelných exotermických reakcí (citelné zvýšení teploty jádra), nebo probíhá rovněž za exotermického děje, ale bez citelného zahřátí. Tato podskupina lze rozdělit na další dvě linie. Jednou jsou ST směsi vytvrzované čistými práškovými kovy, další je N-metoda využívající k vytvrzení FeSi nebo CaSi. [7]

Obě skupiny fungují na principu rozkladu vody kovem, přesněji je to reakce alkalických roztoků s kovy. Jde především o směsi vytvrzované prášky kovů (Al, Zn). Při využití této metody se při vytvrzení vyskytuje vysoká teplota a vodík. Ten je při smíšení se vzduchem vysoce třaskavý,



a proto je nutné při užívání této metody dbát vysoké opatrnosti. Proces lze zapsat jako následující rovnici: [1]



Vodní sklo může být vytvrzováno Esterolem, který obsahuje dvě složky esterů. Při jeho použití dochází k dvoustupňovému vytvrzení. V první fázi se v alkoholovém prostředí uvolňuje kyselina. Ve druhé dochází k tunutí gelu kyseliny křemičité. Při použití tohoto principu vytvrzení se dosahuje menší zbytkové pevnosti. To vede k dobré rozpadavosti po odlití. [7]

### 3. Pojiva III. generace

V této generaci pojiv se využívá k pojení fyzikálních jevů. Jde například o magnetismus, vakuum či využití změny skupenství vody.

#### a) Magnetické metody pojení

Toto jsou formovací směsi, u kterých se využívá magnetismu ostřiva. Jím se zasype spalitelný model opatřený žáruvzdorným nátěrem včetně vtokové soustavy a celá forma se vystaví působení magnetického pole. Důležité však je zajistit homogenitu magnetického pole v celém objemu formy a nepřekročit kritickou teplotní hranici, při které kovové ostřivo ztrácí magnetické vlastnosti. [1]

#### b) Vakuová metoda

Zde se užívá pro vytvoření dutiny odsání vzduchu. Na modelovou desku se přiloží model a rám. Poté se přiloží předeřtá fólie a mezi ní a modelem se vytvoří vakuum. Fólie pevně přilne na povrch modelu a na ni se nasype čisté křemenné ostřivo až do výšky rámu. Rám se pak utěsní druhou fólií. Poté je vývěvou uvnitř rámu opět vytvořeno vakuum. To nám vytvoří kompaktní pojivový systém. [1]

#### c) Metoda EFF-SET

U této metody je využito změn ve skupenství vody. Na modelovou desku uvnitř rámu je nasypáno ostřivo obsahující vyšší množství vody. Ta je vystavena působení kapalného dusíku nebo CO<sub>2</sub>. Je nutné, aby forma



v průběhu odlévání a chladnutí nepřekročila teplotu  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po té hrozí ztráta pevnosti a s tím spojený rozpad formy. [1]

#### **4. Pojiva IV. Generace**

Tato pojiva tvoří látky vznikající při průběhu živých procesů, též zvané jako biogenní. Taková pojiva vyvíjí např. Hormel Foods Corporation (v kooperaci s General Motors) pod názvem GMBOND.

Základem tohoto pojiva jsou proteiny, což jsou látky pocházející z obnovitelných přírodních zdrojů. Pojivový systém tvoří většinou polypeptidové molekuly a dlouhé řetězce aminokyselin. Používá se pro výrobu jader užívaných při lití hliníku. Tepelná degradace těchto pojiv nastává kolem  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  a jsou zcela netoxická. Při testech těchto pojiv bylo zjištěno, že emise vznikající při odlití klesly až o 90% oproti pojivům s fenolitickými pryskyřicemi. Toto pojivo má formu vodou rozpustného prášku, který po rozpuštění ve vodě, smíchání s ostřivem a vysušení vytvoří biopolymerové vazby. Vadná jádra lze velmi jednoduše recyklovat, protože veškeré vazby jsou vratné. Pojiva obsažená v odpadním písku jsou biodegradabilní, odpadní písek tedy nemá charakter odpadu a dá se nadále využívat. [12]

### **2.3 Vlastnosti formovacích směsí**

Od kvalitní formovací směsi se vyžaduje homogenita fyzikálních vlastností (pravidelně rozprostřené pojivo, odpovídající velikost zrn, žádné hrudky ani shluky) a to takových, které si žádají stroje pro formování. Zde budou rozebrány ty nejpodstatnější.

Velmi důležitým faktorem je životnost směsi. To je čas, po který si směs zachovává požadované vlastnosti. Tato vlastnost je ovlivněna především použitým pojivem, dále vnějšími chemickými a fyzikálními podmínkami. Pro výrobu kvalitní formy je třeba, aby formovací směs měla schopnost pohybu ve směru kolmém na směr působící vnější síly. Tuto vlastnost nazýváme tekutost. Dále je třeba, aby směs měla dobrou spěchovatelnost, to jest možnost pohybu ve směru působení vnějších sil. Spojení těchto dvou vlastností se nazývá formovatelnost a to je míra schopnosti co nejlépe vyplnit prostor kolem modelu a přechovat se stejnoměrně v celém objemu. Jednou z nepříjemných vlastností je lepivost, která při nadměrných hodnotách způsobuje lepení formovací směsi na model. V nejhorším případě může



dojít i ke slepení částí formy navzájem. Lepivost je závislá na druhu pojiva, vlhkosti a teplotě směsi. Aby bylo možné s hotovou formou manipulovat bez nebezpečí poničení dutiny, je požadována dobrá pevnost za syrova (tj. po zformování, ale bez sušení) nazývaná též jako vaznost. Dalším důležitým aspektem je tvrdost. Příliš nízká nebo vysoká tvrdost je známkou špatného pěchování a oba extrémy způsobují chyby odlitků (např. zálupy, otěry). Krom dobré tvrdosti je ale potřeba brát zřetel na prodyšnost formovací směsi. Ta umožňuje únik plynů a par z dutiny formy i ze samotného formovacího materiálu. Je ovlivněna zrnitostí ostřiva, druhem pojiva, objemové hmotnosti pěchované formovací směsi. S druhem pojiva se mění také plynotvornost. Ta udává množství plynu, které vyvine směs při vlití kovu do formy. Další technologickou vlastností je navlhavost, tou se rozumí přijímání vzdušné vlhkosti po zformování. Čím více vzdušné vlhkosti přijme směs, tím bude forma méně pevná a zvýší se i množství páry vytvořené při odlití. Je-li dbáno na dobrou rozměrovou přesnost, je třeba vzít v úvahu objemové změny formovací směsi způsobené tepelnou dilatací zrn ostřiva (viz. Kyselá ostřiva, polymorfní modifikace křemene). Z hlediska kvalitního tuhnutí po odlití je směrodatná rozpadovost formovací směsi. Ta nám zaručí, že se bude odlitek moci při ochlazení smršťovat, aniž by mu jádro bránilo ve zmenšení. Rozpadovost je ovlivněna volbou správného pojiva. [4]

## 2.4 Dělení formovacích směsí

### 1. Dle procentuálního množství obsažené vody:

- a)  $H_2O$  do 0,1% - bezvodé směsi. Zde jsou plastifikátorem pojiva organické sloučeniny, především se jedná o alkoholy.
- b)  $H_2O$  do 3% - polosuché směsi. Jsou to směsi, které nepotřebují velké plastifikační vlastnosti, protože jsou určeny výhradně pro strojní formování vysokými měrnými tlaky.
- c)  $H_2O$  do 5% - směsi na syrovo. Jde o nejprogresivnější výrobu forem. Lití do této formy může probíhat bez jakéhokoli sušení.
- d)  $H_2O$  do 7% - směsi na přisušení. Po krátkém intenzivním sušení se do nich musí ihned odlévat, aby nedošlo k opětovnému navlhnutí.



- e)  $H_2O$  vyšší než 7% - směsi na vysušení (též známé jako vypalovací směsi). Suší se v celém objemu, kdy se vysušuje volná voda. Pak se vypalují při 450 – 600 °C, aby se odstranila i chemicky vázaná (hydroxilová) voda. [1]

## **2. Podle způsobu použití na:**

- a) Modelové – ty, které tvoří líce formy. Musí být vysoce kvalitní, při odlévání jsou v přímém styku s kovem.
- b) Výplňové – vyplňují zbytek formy. Většinou jde o recyklát z použitých jader. Její vlastnosti byly pouze homogenizovány opětovným zavlhčením a rozmísením.
- c) Jádrové – jde o velmi kvalitní směsi z vysoce jakostních surovin. Požadavky na ně jsou ještě vyšší, než na modelové směsi. Bývá vysoce tepelně namáhána, navíc musí odolávat penetraci taveniny mezi póry. Též musí být dlouhodobě skladovatelné a mít dobrou rozpadovost po odlití.
- d) Jednotné – jde nejčastěji o Bentonitové směsi pro strojní formování, které tvoří jak líc, tak samotnou výplň formy. Její vlastnosti jsou upravovány dokonalou regenerací ze směsi vratné. Jsou vyžadovány především při lití šedé litiny nebo oceli na syrovo. [1]

## **2.5 Plynotvornost slévárenských směsí**

Schopnost směsí vyvíjet při tepelném zatížení plyny a páry se nazývá plynotvornost. Hodnoty plynotvorností jsou dány především tepelným zatížením a složením směsí, dále pak jejím sklonem k navlhavosti (přejímání atmosférické vlhkosti), zrnitostí užitých ostřiv, pojivy a přísadami užitých při výrobě směsí.

Plynotvornost je důležité definovat nejen pomocí maximální vyvinuté hodnoty [ $cm^3/g$ ], ale i závislostí objemu vytvořených plynů na čase, tedy rychlostí vývinu těchto plynů. Vzorky jsou voleny o hmotnosti jeden gram z hlediska výpočtové jednoduchosti, jako jednotka objemu se nejčastěji volí  $cm^3$ . [13]

### **2.5.1 Vývin plynů a par ve slévárenské formě[13]**

V okamžiku dotyku taveniny s lícem formy dochází ke sdílení a tepla. To se šíří formou v termálně ekvipotenciálních plochách, přičemž teplota jednotlivých ploch klesá úměrně s jejich vzdáleností od líce formy. Hodnotu teplot





ovlivňují podmínky na rozhraní tavenina-forma a fyzikální vlastnosti materiálu (např. měrná tepelná kapacita), z něhož jsou vyrobeny formy či jádra.

Při prohřívání jednotlivých vrstev dochází u materiálu formy k chemicko-tepelným reakcím – to vede k vývinu plynů. Plyny se vylučují nejdříve z částí s nejnižší teplotou rozkladu, s nárůstem teplot se začínají štěpit části formy s vyššími teplotami rozkladu.

Ve směsi plynů převládají chemicky prvky  $H_2$  a  $CO$ . Při jejich úniku do atmosféry formy vzniká tlak, jehož velikost je přímo úměrná objemu vytvořených plynů a par – je však nutno vzít v potaz prodyšnost formy.

K příčinám vývinu plynů ve slévárenských formách můžeme přiřadit následující faktory:

### ***1. Tepelná expanze vzduchu v dutině formy***

Při ohřevu dutiny formy se bude objem vzduchu, který byl ve formě uzavřen zvětšovat. Navzdory tomu, že vzduch uzavřený v pórech mývá objem rovnající se 26-38% objemu směsi se větší částí nepodílí na plynotvornosti směsi. Tento vzduch odchází převážně přes výfuky a částečně i přes póry forem a jader.

### ***2. Vypařování volné vody, kapalných látek a rozpouštědel***

Vypařování vody se nejvíce podílí na vývinu plynů a par, zejména při použití jílových formovacích směsí a odlévání za syrova. Mimo vypařování vody mohou skupenství měnit i jiné kapalné látky – např. rozpouštědla.

Směs obecně obsahuje vodu vázanou několika způsoby.

- a) Chemicky – voda je součástí krystalové mřížky minerálů. Tato voda se uvolňuje až při vysokých teplotách.
- b) Fyzikálně-chemicky – voda tvoří disperzní prostředí koloidních soustav pojiv.
- c) Mechanicky – voda je vázána pomocí kapilárních a smáčivých sil.

### ***3. Destilace organických látek***

Pomalý tepelný rozpad organických látek při zamezení nebo při omezeném přístupu vzduchu zajistí uvolnění těkavějších frakcí a postupně se uvolňují i frakce méně těkavé. Tento proces je doprovázen větším množstvím par, olejů, nasycených a nenasycených uhlovodíků. Výsledkem reakce je koks.





#### **4. Tepelná disociace vodních par a plynů**

Při vysokých teplotách v důsledku již popsanych dějů nastává rozklad uhlovodíků. Tento jev je zodpovědný za zvětšování objemu plynů a za usazování uhlíku ve formě sazí

#### **5. Spalování organických látek**

V teple vystavených směsích dochází za přítomnosti vzdušného kyslíku, vodních par a  $\text{CO}_2$ . Vzdušný kyslík je v začátku obsažen v pórech, při hoření difunduje z vnějšku formy pomocí póru k ohnisku spalování. Zdroje kyslíku jsou však omezeny a po vyplnění dutiny tekutým kovem je průchod kyslíku téměř zastaven (to je způsobeno zejména působením velkého množství plynů snažících se uniknout z formy v opačném směru, taktéž pomocí pórů).

Tento proces způsobuje neúplné okysličení a tím podporuje vznik CO.

#### **6. Tepelný rozklad minerálů a uhličitánů**

Při ohřevu některých materiálů formovací směsi se uvolňuje plynná složka. Součástí minerálu je i voda vázaná ve třech podobách

- a) Konstituční voda – nejpevnější vazba s krystalickou mřížkou. Uvolnění nastává při určité teplotě, obvykle při vypalování nebo při chemické reakci. Proces není vratný a minerál se při ztrátě vody rozpadá.
- b) Krystalizační voda – slabší vazba na krystalickou mřížku. Uvolňuje se při žhání, někdy ve více intervalech.
- c) Volně vázaná voda – přestože proniká do krystalické mřížky, není chemicky vázaná. Pevnost vazby je dána délkou kontaktu s minerálem, teplotou tlakem a jinými vlivy.

### **2.5.2 Průnik vytvořených plynů z formy do taveniny**

Pro tvorbu kvalitních odlitků je nezbytné děje plynotvorností pozorně sledovat. Při nevhodných podmínkách na rozhraní forma-kov zde můžou vznikat vady odlitků. Pokud tlak plynů u vyústění pórů přesáhne určitou úroveň, naruší povrch taveniny a vzniká zárodek bubliny.



Mezní tlak je dán vztahem (2.1)

$$P_F = \sum P \quad (2.6)$$

$$\sum P = P_m + P_p + P_{pf} \quad (2.7)$$

, kde je  $P_f$ - tlak plynů

$P_m$  – metalostatický tlak

$P_p$  – odpor kovu proti vniknutí bubliny

$P_{pf}$  – přetlak plynů nad hladinou taveniny

Zde mohou nastat tři situace:

- 1)  $P_f < \sum P$  – Vzniká zde nebezpečí pronikání taveniny mezi póry formy a tím dochází ke vzniku zapečenin.
- 2)  $P_f > \sum P$  – Vyvinuté plyny mohou narušit celistvý povrch taveniny a je zde možnost vytváření bublin.
- 3)  $P_f = \sum P$  – Toto je ideální případ, kdy odlitek dosáhne předepsané povrchové drsnosti, na kterou má vliv velikost pórů

Největší rychlost vývinu plynů lze očekávat v momentě styku kovu s lícem formy. V této chvíli je na povrchu jen velmi tenká vrstva ztuhlého kovu a proto je vyvozen velmi nízký metalostatický tlak. Na rozhraní forma-kov dochází k hromadění plynů a k pozvolnému narůstání tlaku. V momentě, kdy se tlak nastřádaných plynů bude rovnat tlaku metalostatickému, začnou se na povrchu odlitku tvořit zárodky bublin. Narůstá-li hodnota tlaku i nadále, zárodek se prohlubuje, než dojde k zaškrcení bubliny a tím dojde k jejímu uvolnění do taveniny. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud bude forma chemicky aktivní.

Vznik bublin není vyvozen pouze plynotvorností směsi. Je nezbytné vzít v potaz i zrnitost, procentuální obsah pojiva a jeho druh, prodyšnost, navlhavost a další parametry formovací směsi.[6],[9]



## 2.6 Způsoby stanovení plynovornosti

V současnosti existuje poměrně mnoho metod určování plynovornosti. Navzdory tomu dodnes nedošlo ke sjednocení a normalizaci podmínek vnějších vlivů, při kterých zkouška probíhá. Metody se liší ve způsobu identifikace množství plynů, teplotami a způsobem ohřevu atp. Proto je důležité zmínit, že není možné porovnávat výsledky a závěry z měření získaných odlišnými metodami. [14]

### 1. Metody laboratorní

též známé jako nepřímé. Jde o simulační postupy, kdy tepelné zatížení taveniny nahrazujeme pomocí sálavého tepla vytvořeného pecí. Namísto celého jádra se používá vzorek o navážce několika gramů umístěný na lodičce z tepelně velmi odolných materiálů. Vzorek se vsune do pece předehřáté na předepsanou teplotu a tím se zatíží tepelným šokem. Pec je hermeticky uzavřena a spojena s měřicí aparaturou registrující buď

- a) objem vyvinutých plynů v závislosti na čase nebo
- b) tlak vyvinutých plynů v závislosti na čase

Nevýhody použití nepřímých metod vycházejí ze samotné podstaty simulace. Jde především o absenci vlivu relativní tloušťky jádra či odlitku. Nadále je vzorek prohříván za izotermických podmínek, což nekoresponduje s reálným stavem, kdy teplota odlitého kovu klesá.

Ve výsledku tedy tyto simulace nepostihují skutečné tepelné poměry v jádrech. Jde např. o metodu SVÚM Brno. [14]

### 2. Metody provozní

známé i jako metody přímé. Tyto metody se zakládají přímo na použití formy či jádra sledovaného odlitku (lze použít i upravené vzorky). Zatížení vzorků je provedeno přímo tekutým kovem – sledované směsi se tedy kolísavě ohřívají vlivem nedokonalého kontaktu s taveninou. Tím je možné, pečlivěji než u laboratorních metod, zajistit tepelně-fyzikální podmínky blízké skutečným průběhům. Děj zde není izotermický – s poklesem teploty taveniny klesá i intenzita prohřátí jader. Množství vyvinutých plynů se měří obvykle pomocí tlaku plynů.

Mezi tyto metody patří např. metoda dle Spaského, Berga či Jašina[14]



### 3 Experimentální část práce

Záměrem experimentální části této bakalářské práce bylo proměření plynovtornosti vytvrzeného jádra s pojivovým systémem CT a bentonitové formovací směsi. Měření probíhali na katedře KSM TU v Liberci na laboratorním zařízení zkonstruovaného v letech 1991-1995, které prošlo již několika podstatnými úpravami. V průběhu mých měření došlo k dalším úpravám týkajících se především elektroinstalace snímače tlaku a chladicího okruhu.

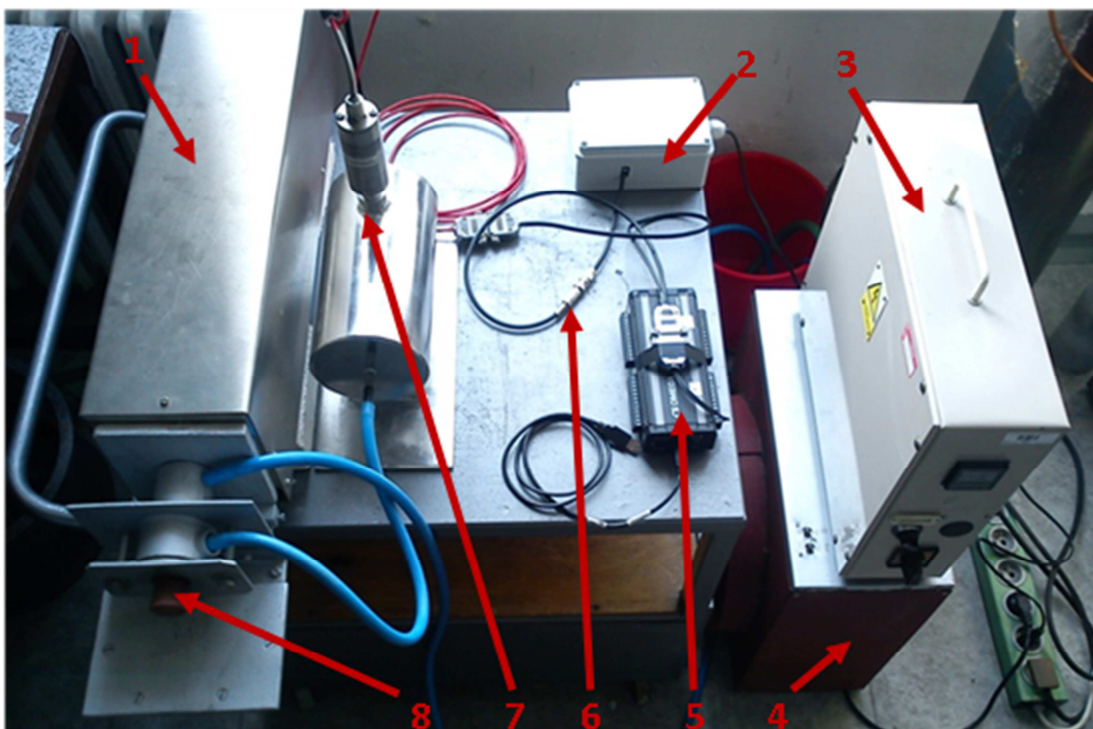
#### 3.1 Charakteristika měřicího zařízení

Jedná se o zařízení pro nepřímé metody měření vycházející z konstrukce firmy +GF+, přesněji zařízení PGD. Principiálně jde o měření tlaku vyvíjejících se plynů. V hermeticky uzavřeném prostoru Marsovy pece dojde k tepelnému zatížení (maximální teplota se pohybuje okolo 1300 °C) jednogramového vzorku formovací či jádrovací směsi. Vývin plynů je sledován pomocí tlakového senzoru, jenž je propojen s dutinou pece. Výstup čidla je přiveden na sběrnici opatřenou A/D převodníkem, která je pomocí USB propojena s PC, kde dochází k registraci dat ve formě úrovně napětí v závislosti na čase.

Na tomto zařízení již došlo k několika měřením, jejichž výsledky zpracovali ve svých studentských pracích MACHUTA [6], JENČOVSKÝ [8], KOČÍ [9], čímž byla ověřena správná funkce zařízení.



Měřicí aparatura na KSP se sestává z hlavních částí uvedených na obr 3-1:



1 – Marsova pec; 2 – napájecí zdroj čidla; 3 – regulátor pece; 4 – chladicí aparát;  
 5 – datová sběrnice; 6 – propojovací datové kabely; 7 – expanzní nádoba s čidlem;  
 8 – uzavírací zátka s lodičkou

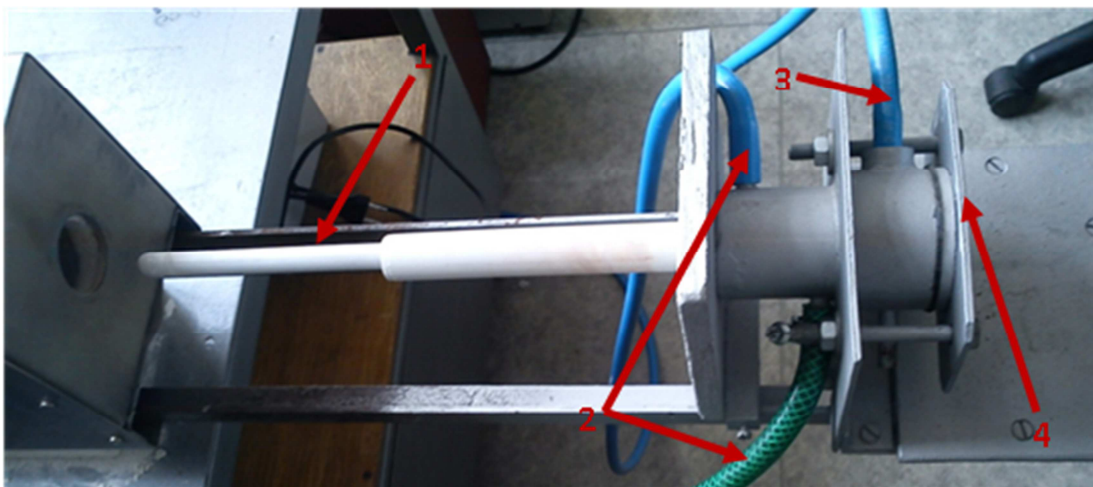
**Obr. 3-1 Hlavní části měřicího zařízení pro stanovení plynotvornosti na KSP**

### 1. Marsova pec

Tento druh pece funguje na principu vyhřívání odporovým drátem. Pro zpětnou vazbu nutnou pro správný chod regulátoru pece v prostoru pece zabudován termočlánek udávající hodnoty o aktuální teplotě. Z čela pece je na posuvných kolejnicích umístěna speciální křemenná trubice opatřena ústím pro vkládání vzorků a postranním výstupem pro připojení hadic k tlakovému čidlu. Ústí trubice je vybaveno osazením, díky kterému je možné ústí trubice chladit a tím snížit tepelné namáhání zátky. Vnitřní objem trubice činí v uzavřeném stavu (tedy včetně zátky a lodičky) 55 cm<sup>3</sup>. Před každým započatým měřením je třeba provést zkoušku těsnosti této soustavy. Je nezbytně nutné dbát zvýšené opatrnosti. Při manipulaci s vyhřátou pecí se nedoporučuje vypínat okruhy chlazení, vytahovat vyhřátou keramickou trubici (tepelný šok ji může nenávratně poškodit). Dále se upozorňuje na to, že i přes krytování a dobré odstínění může povrch pece dosahovat celkem



vysokých teplot a proto se nesmí přes pec vést jakékoli elektrické vedení (ať už datové či napájecí) a cokoliv na ni pokládat, neboť hrozí nebezpečí vzplanutí.



1 – křemenná trubice; 2 – chladicí okruh hlavice; 3 – hadice čidla; 4 – hlavice Marsovy pece;

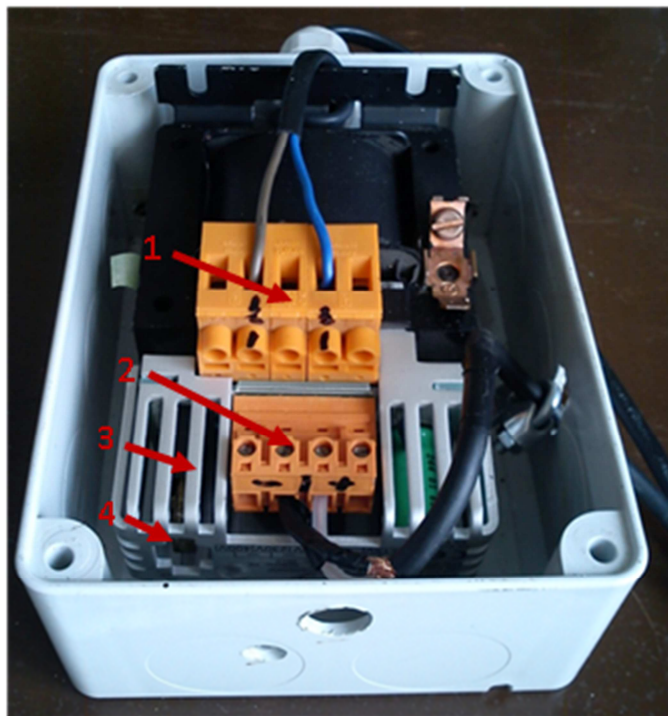
**Obr. 3-2 Pohled na zařízení Marsovy pece**

## 2. Napájecí zdroj čidla

Tento zdroj typu SELV (Safety Extra-Low Voltage) mění síťové napětí na 25 V stejnosměrného, s vysokou jakostí vyhlazeného, průběhu. Napájecí zdroj čidla je vybaven přepětovou pojistkou o velikosti 3 A a šňůrovým průběžným vypínačem. Je umístěn v krabici s krytím IP55 a napájení je provedeno přes konektor TNC (viz kapitola 2.1.1.6 Propojovací datové kabely). Před zapnutím vypínače je vhodné zkontrolovat správnost zapojení konektorů datového svazku na čidle i sběrnici a připojení USB portu do PC. Po zapojení lze funkci napájecího zdroje čidla zkontrolovat pomocí informační LED diody.







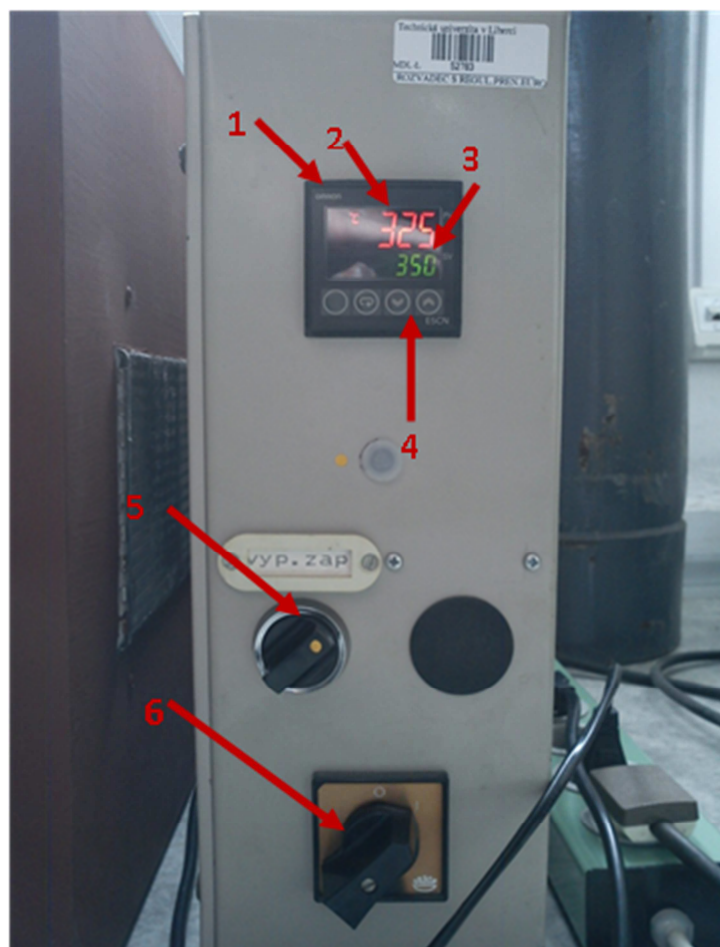
*1 – primární okruh; 2 – sekundární okruh; 3 – usměrňovač; 4 – kontrolní dioda*

***Obr. 3-3 Napájecí zdroj čidla***

### ***3. Regulátor pece***

Regulátor pece obsahuje veškerá ovládací rozhraní nezbytná pro chod pece. Pomocí ovládacích prvků nastavíme buď předepsaný program, nebo přímo hodnotu požadované teploty, na kterou chceme pec vyhřát. Po uvedení pece v chod regulátor získává pomocí termočlánku umístěného v peci zpětnou vazbu a je tak schopen velmi přesně udržovat pec v předepsaných teplotách. Teplota pece se reguluje nespojitě pomocí výkonových impulzů do odporových drátů. LED display nám poskytuje okamžité informace ohledně aktuální teploty uvnitř pece a nastavené cílové teploty, zda právě probíhá impulz do pece atd. .





1 – ovládací rozhraní; 2 – aktuální teplota; 3 – cílová teplota; 4 – ovládání cílové teploty; 5 – spínač vytápění pece; 6 – hlavní vypínač;

**Obr. 3-4 Regulátor Marsovy pece**

#### **4. Chladicí aparát**

V předchozí verzi měřicího zařízení bylo chlazení hlavice Marsovy pece realizováno napojením na vodovodní řád. To značně komplikovalo měření, protože bylo nezbytné přesunout celou měřicí aparaturu k vodovodnímu zdroji. Při přesunu hrozilo nebezpečí poškození citlivých zařízení, které soustava obsahuje. Nadále se v hlavici Marsovy pece usazovaly kaly, nečistoty a vodní kámen, což by časem vedlo ke snížení průtoku chladicího média či dokonce k úplnému zastavení chladicího okruhu.

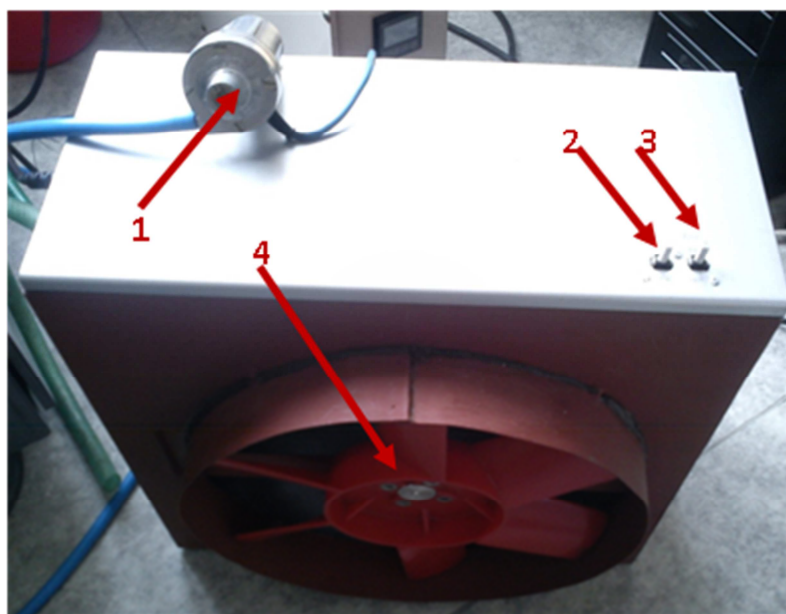
Vzhledem k velké finanční náročnosti komerčně nabízených chladících zařízení bylo rozhodnuto sestavit chladicí aparát vlastnoručně.





Chladicí aparát byl zkonstruován v laboratorních podmínkách zatím pouze prozatímně, dokud se neobjeví vhodnější metoda chlazení okruhu pece. Přístroj využívá šasi i zdroj ze starého PC, který byl vybaven radiátorem topení z osobního automobilu. Ten zde plní funkci chladiče. Zdroj má parametry 12 V / 450 W a je vybaven ochranou proti zkratu. Velikou výhodou celého zařízení je provoz na bezpečné napětí, tedy do 12-ti voltů. Nadále byl aplikován límec s chladicí vrtulí a motorem, taktéž z osobního automobilu. Pro oběh vody bylo zvoleno ponorné čerpadlo 12 V/4 A, které je pro tuto aplikaci zcela dostačující.

Na horní desce zařízení jsou dva pákové vypínače. První spouští čerpadlo a druhý ventilátor, přičemž chladicí ventilátor je možné sepnout pouze v případě, že je v chodu i čerpadlo. Pro správnou funkci chladicího systému se musí čerpadlo ponořit do nádoby s alespoň 5-ti litry chladicího média. Do této nádoby je taktéž umístěn výstup z chladiče. Teplotu lze odhadnout pocitově buďto na chladiči nebo v nádobě s chladicím médiem. Toto zařízení je připraveno pro automatizaci, zejména pro regulaci otáček řízenou PWM (pulzně-šířkovou modulací) se zpětnou vazbou na teplotu chladicího média.



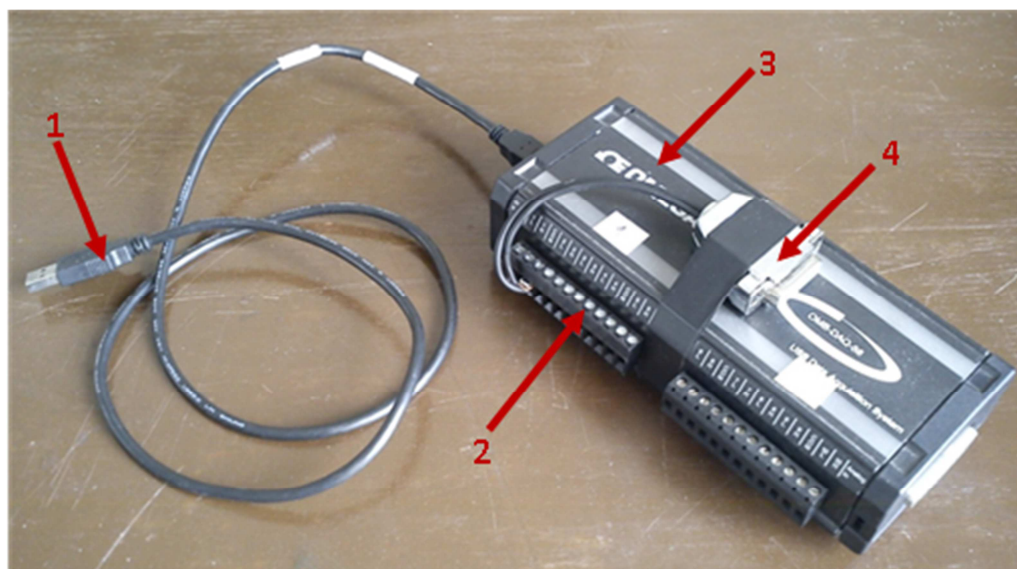
1 – ponorné čerpadlo; 2 – spínač čidla; 3 – spínač vrtule chladiče;  
4 – vrtule chladiče;

***Obr. 3-5 Chladicí aparát zkonstruovaný na KSP***

## 5. Datová sběrnice

Tato sběrnice dat vyráběná firmou Omega typu OMB-DAQ-56 je universální sběrnicí pro sběr dat. K počítači je připojena pomocí rozhraní USB, kterým je i napájena. Vstupy se dělí na napěťové, frekvenční a digitální. Dále se nám nabízí možnosti zapojení se sledováním potenciálu vůči zemi či diferenciálně (viz. Obr. 3-6). Nadále je zařízení vybaveno 22bitovým A/D převodníkem umožňujícím nám digitalizovat spojitý signál, a to s maximální periodou snímkování od 12,5 ms. Sběrnice je schopná zpracovávat signál v rozmezí -10V až 20V s frekvencí od 0 do 1 MHz.[10]

Přestože ke sběrnici je přiložena vlastní svorkovnice, byla v průběhu tvorby této bakalářské práce osazena 15-ti žilovým konektorem typu CAN 15, především kvůli možnosti rychlého propojení pomocí datových svazků, ale i proto, že snímané signály mohou dosahovat velmi nízkých hodnot a je nezbytné zajistit vodičům dostatečně stínění.



1 – USB kabel; 2 – svorkovnice sběrnice; 3 – sběrnice; 4 – konektor CAN-15;

**Obr. 3-6 Datová sběrnice OMB-DAQ-56**

## 6. Propojovací datové svazky

V původní konstrukci zařízení tyto kabely nahrazoval přívodní kabel čidla. To se ale v průběhu měření mé bakalářské práce ukázalo jako zcela nevyhovující, a to především kvůli slabé resistenci vůči zarušení datového vodiče.

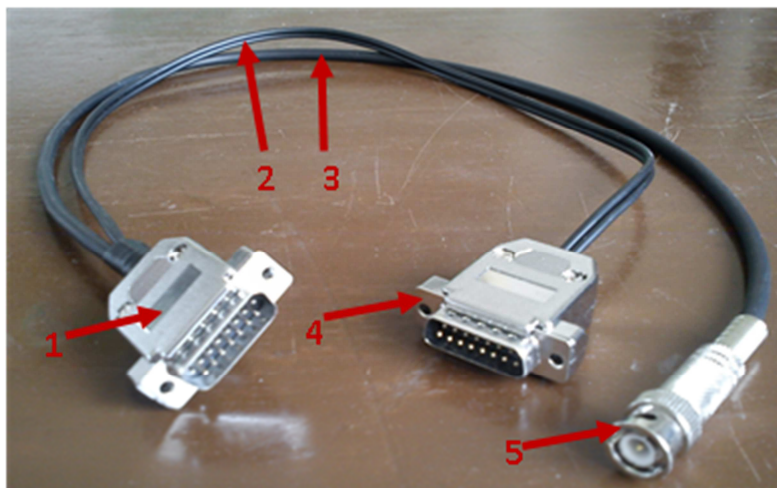


Zarušení způsobovala nejen výkonová zařízení, jako např. signál mobilního telefonu, pulzy ve výkonovém napájecím vodiči Marsovy pece, ale i pouhý dotek ruky. Zkreslování signálu se podílelo velkou měrou na chybách v měření a to především v oblasti extrémně nízkých napětí (berme v úvahu, že ve vodiči se průběh napětí pohybuje od tisícín až po desítky voltů). Tento jev narušoval objektivitu měření a projevoval se např.: kolísavými průběhy sinusových tvarů, velkými krátkými špičkovými hodnotami a velmi nestálým průběhem při klidových stavech čidla (viz příloha č. 1).

Nadále bylo zjištěno několik nedostatků v původním zapojení. Týkaly se uzemnění opletu datového vodiče a toho, že některé vodiče byly ponechány volně. Z měření na prozatímne upravených vodičích vyplynulo, že je důležité chránit i vodiče napájející dělicí můstek tlakového čidla, protože chyby na průběhu se mohou projevit i v hodnotách difference uprostřed můstku.

Pro napájení byl tedy volen koaxiální kabel, jehož oplet je uzemněn na výstupu napájecího zdroje čidla a na středový vodič bylo přivedeno napájecí napětí čidla. Spojení s datovým svazkem bylo realizováno pomocí BNC konektoru. Samotné datové propojení mezi čidlem a sběrnici pomocí 2 konektorů typu CAN15, jimiž je osazeno jak rozhraní čidlo-datový svazek, tak i přechod datový svazek-sběrnice. Tyto konektory mají velmi dobrou odolnost proti působícím rušivým zářením. Datový tok mezi sběrnici a čidlem byl vytvořen pomocí dvojlinky koaxiálních kabelů, jejichž oplet byl spojen s uzemněním napájecího zdroje čidla.





1 – konektor CAN 15 k čidlu; 2 – datový vodič; 3 – napájecí koaxiální vodič;  
 4 – konektor CAN15 k datové sběrnici; 5 – BNC konektor k napájecímu zdroji čidla;

**Obr. 3-7 Sestava propojovacích datových svazků**

Nová kabeláž a užití stíněných konektorů velmi výrazně snížili podíl rušení na výsledcích měření pohybujícího se v nižších hodnotách napětí a zajistily tím odpovídající kvalitu vedení pro potřeby měření pomocí takto citlivého čidla.

Před spuštěním napájecího zdroje čidla je velmi důležité opětovně zkontrolovat, zda je sestava správně zapojena.

Výrobu datového svazku, měření kontrolního průběhu a porovnání s původním stavem naleznete v příloze č. 1.

## **7. Expanzní nádoba s čidlem**

Obecně lze říci, že kvalitu měření určuje kvalita použitého měřicího aparátu. V tomto případě jde o tlakové čidlo PXM02MC 0-160mBAR vyráběné firmou Omega. Jde o čidlo, jehož rozsah je 0-160mBAR a je schopné pracovat v teplotním rozsahu od -46 °C do 121 °C, přičemž v rozsahu 16 °C-71 °C je čidlo schopné kompenzovat vlivy teploty na naměřené hodnoty. Čidlo je pasivního charakteru, je tedy třeba jej napájet, a to v napětovém rozsahu 10 V-40 V. Podstata měření na samotném čidle je realizována pomocí čtyř, do můstku rozmístěných tenzometrů nalepených na kovové membráně v hermeticky uzavřené komoře.



***Obr. 3-8 Čidlo OMEGA PXM02MC 0-160mBAR s konektorem CAN 15***

Při dilataci membrány vlivem tlaku se mění odpor tenzometrů a na diagonále můstku se vytvoří rozdíl potenciálů napětí. Ten může být tepelně kompenzován a je vyveden do 6-ti žilového koaxiálního kabelu ukončeného naletovaným konektorem typu CAN15. Proudový výstup čidla se pohybuje v intervalu 4-20mA. [11]

Popis jednotlivých vodičů a jejich zapojení v konektoru naleznete v příloze č. 1.

Čidlo je utěsněno pomocí vlákna pro těsnění závitů LOCTITE 55 a zašroubováno do expanzní nádoby. Samotná těsnicí nádoba je z nerezových plechů a má objem 1968 cm<sup>3</sup>. Na ústí nádoby je navlečena hadice spojující ji s dutinou Marsovy pece. Je třeba dbát na to, aby se hadice na ústí nádoby kryla s ryskou. Tím docílíme vždy stejného objemu soustavy a s tím spojené reprodukovatelnosti výsledků.





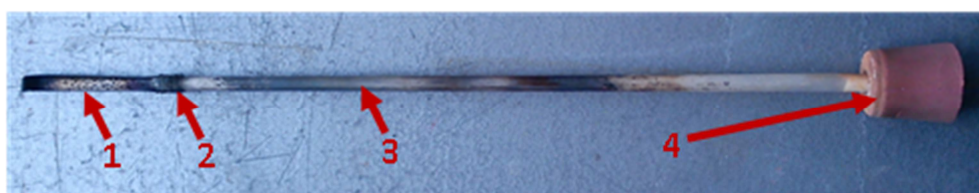
**Obr. 3-9 Expanzní nádoba**

### 8. Uzavírací zátka s lodičkou

Toto zařízení slouží k zavedení vzorku do pece a zároveň k zatěsnění soustavy.

Lodička samotná je vytvořena z molybdenového plechu a má vhodný tvar pro vložení sypkého vzorku o objemu  $625 \text{ mm}^3$  (cca 2g bentonitové formovací směsi), či vložití pevného vzorku o rozměrech  $50 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ . Do posledních 10mm lodičky je vsunuta 265mm dlouhá křemenná tyčinka a celé spojení trubice s lodičkou je převinuto chromovým či nikl-chromovým drátem. Křemenná tyčinka je na konci umístěna do pryžové zátky, která přesně zapadne do ústí pece. Tím je realizováno zatěsnění soustavy.

Právě tato součást má nejvíce záporný vliv na konzistenci výsledků měření. Uzavírací síly se pokaždé mění a tím vyvolávají objemové změny projevující se na naměřených hodnotách. Vhodným cvikem se dají tyto záporné vlivy eliminovat na minimum. Cílem je homogenizovat rychlost zavádění lodičky do pece, a vyvodit stejné uzavírací síly.



1 – lodička z molybdenového plechu; 2 – drátové spojení pomocí nikl-chromového drátu; 3 – křemenná tyčinka; 4 – uzavírací pryžová zátka

**Obr. 3-10 Uzavírací zátka s lodičkou**



### **9. Popis softwarových součástí měřicího zařízení**

Ke sběrnici OMB-DAQ-56 se dodává i řídicí software s názvem PersonalDAQView. Tento program nám umožňuje v uživatelském prostředí předepsat intervaly snímkování, zvolit kanál který bude aktivní. Pro všechna provedená měření v této práci bylo užito snímkování po 200 ms. Takto krátký interval byl zvolen především kvůli dobrému vyhlazení křivek a dostatečnému množství hodnot. Nadále umožňuje sledovat graficky vyobrazený průběh veličin i během měření. To napomáhá včasné odhalit chybu způsobenou např. špatným utěsněním pece.

Dále je možno předepsat časový rozsah měření, po kterém bude ukončeno a uloženo do předem stanoveného adresáře (u proběhlých měření vyjma kalibrace byl nastaven na 650 snímků – tedy 130 sec.). Soubor obsahuje časovou osu a k ní přiřazenou hodnotu napětí ze všech aktivních vstupů sběrnice. Tyto data se zpracovávají tabulkovým procesorem Excel a vyobrazí se v podobě grafů.

## **3.2 Metodika přípravy vzorků, kalibrace, měření a zpracování dat**

Jak již bylo psáno výše, k měření se používá nepřímé metody fungující na principu zařízení PGD. I při využití moderních metod je třeba nepodcenit přípravu vzorků, zařízení a dodržet stanovené postupy při měření. Z hlediska statistické eliminace chyb je třeba provádět měření při jedné teplotě alespoň pětkrát, přičemž při měření této práce byla každá teplota přeměřena na deseti vzorcích. Měření proběhlo za teplot 800 °C, 1000 °C, 1200 °C a vždy šlo o tepelné zatížení šokem (vzorek vložen do pece vyhřáté na požadovanou teplotu). Pro měření byly zvoleny 2 směsi. Jedna odebírána z vytvrzeného jádra a druhá byla sypké podstaty.

Zaznamenávání dat probíhá od okamžiku zavedení vzorku do pece v časovém úseku trvajícím 120 sec. Předpoklad je takový, že po tomto čase bude mít tavenina na povrchu dostatečnou vrstvu ztuhlého kovu zabraňující pronikání plynu do taveniny a proto je delší měření bezpředmětné.

### **1. Příprava vzorků**

Výhodou této metody je, že je možné měřit jak sypké směsi, tak i vytvrzená jádra. U hotových jader je třeba vytvořit vzorky o rozměrech max. 5x5x50 mm s tím,



že jejich hmotnost musí být  $1\text{g} \pm 0,01\text{g}$ . Je vhodné, aby každý vzorek byl odebrán z jiné části jádra a tím se zvýšila přesnost měření. Měření pro jednu teplotu musíme mít dostupných deset vzorků.

Z hotového jádra jsou vzorky odebírány pomocí ruční pily, konečného tvaru a hmotnosti docílíme úpravou vzorku pomocí pilníku. Vážení probíhalo na váze RADWAG WPS 4000/C/2 s požadovanou přesností.

U sypkých materiálů je příprava jednodušší. Na váhu je umístěna nádoba se sypkou směsí a provede se nulování. Poté se směs odebírá přímo lodičkou a odsypává zpět do nádoby, dokud není údaj na váze -1g s tím, že na lodičce by se neměli vyskytovat zatvrdlé hrudky směsi.

U sypkých směsí nebo u ostřiva užitého při výrobě jádra můžeme provést síťový rozbor a zjistit střední velikost zrna. Protože cílem práce nebylo měřit plynotvornost jednotlivých frakcí, nemá v tomto případě měření jiný, než čistě informativní význam.



***Obr. 3-11 Váha RADWAG W/S 4000/C/2***



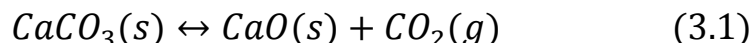


## 2. Kalibrace

Před použitím zařízení je nezbytné zjistit koeficient  $K$ , pomocí kterého získáme převod z napětí na tlak. Tuto konstantu zjišťujeme pomocí kalibrací, které se dají provést dvěma způsoby.

### a) Kalibrace pomocí tepelného rozkladu uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ )

Ten se při teplotách od  $850\text{ }^\circ\text{C}$  do  $894\text{ }^\circ\text{C}$  rozkládá dle rovnice (3.1):



a dle vzorce (3.2) můžeme vypočítat objem vyvinutých plynů.

$$V = \frac{V_m \cdot m}{M_{\text{CaCO}_3}} \quad (3.2)$$

, kde  $V_m$  – molekulový objem plynu

$m$  – hmotnost  $\text{CaCO}_3$

$M_{\text{CaCO}_3}$  - molární hmotnost  $\text{CaCO}_3$  [6]

### b) Pomocí zátěžové pumpy AMATEK

Při tvorbě této práce byla několikrát provedena kalibrace pomocí zátěžové pumpy AMATEK na pracovišti katedry KEZ. Měření se provádí v oblasti tlaků 1-10 kPa.

Kalibrační pumpa se nejdříve seřídí do přesně vodorovné polohy a její výstup se připojí na expanzní nádobu s čidlem. Po zapnutí měřicí aparatury a spuštění programu na kalibrační pumpu vkládáme velmi přesná závaží a tím regulujeme tlak od 1 kPa do 10 kPa s krokem po 1 kPa. Výsledkem je tabulka a křivka určující závislost vstupního tlaku na napětí zjištěném čidlem. Z těchto dat se pomocí propočtu (3.3) vypočítá převodová konstanta  $K$

$$K = \frac{dU}{dP} \quad (3.3)$$

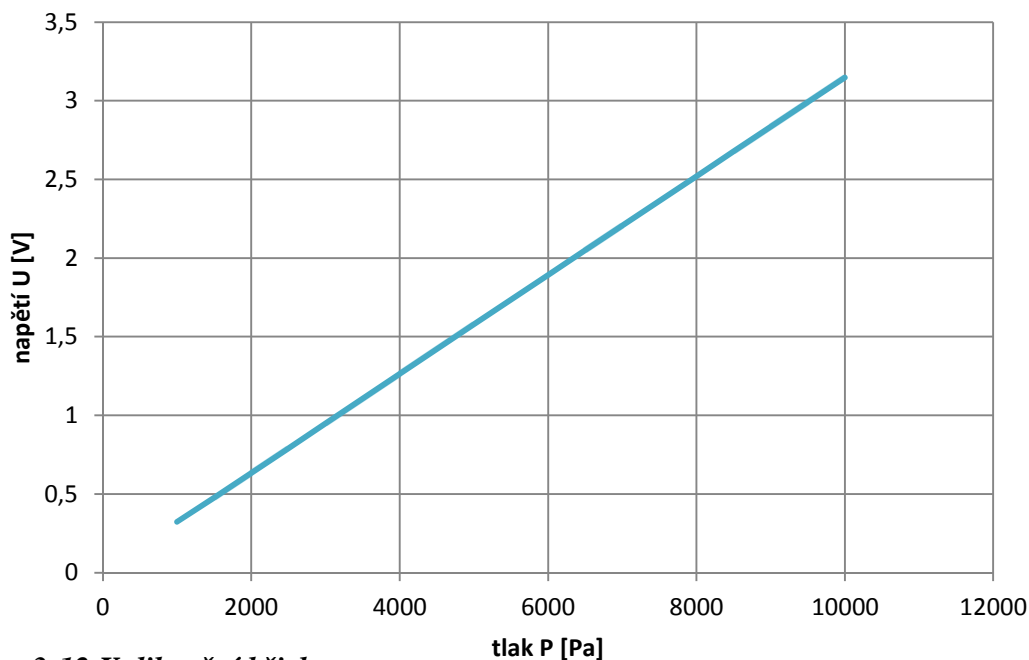
, kde  $K$  - přepočtová konstanta [V/Pa]

$dU$  - diferenciál napětí [V]

$dP$  - diferenciál tlaku [Pa]



Z naměřených hodnot a průměrů vyplynuly hodnoty uvedené v tabulce 3-1.



**Obr. 3-12 Kalibrační křivka**

**Tab. 3-1 Tabulka měření převodní konstanty  $K$**

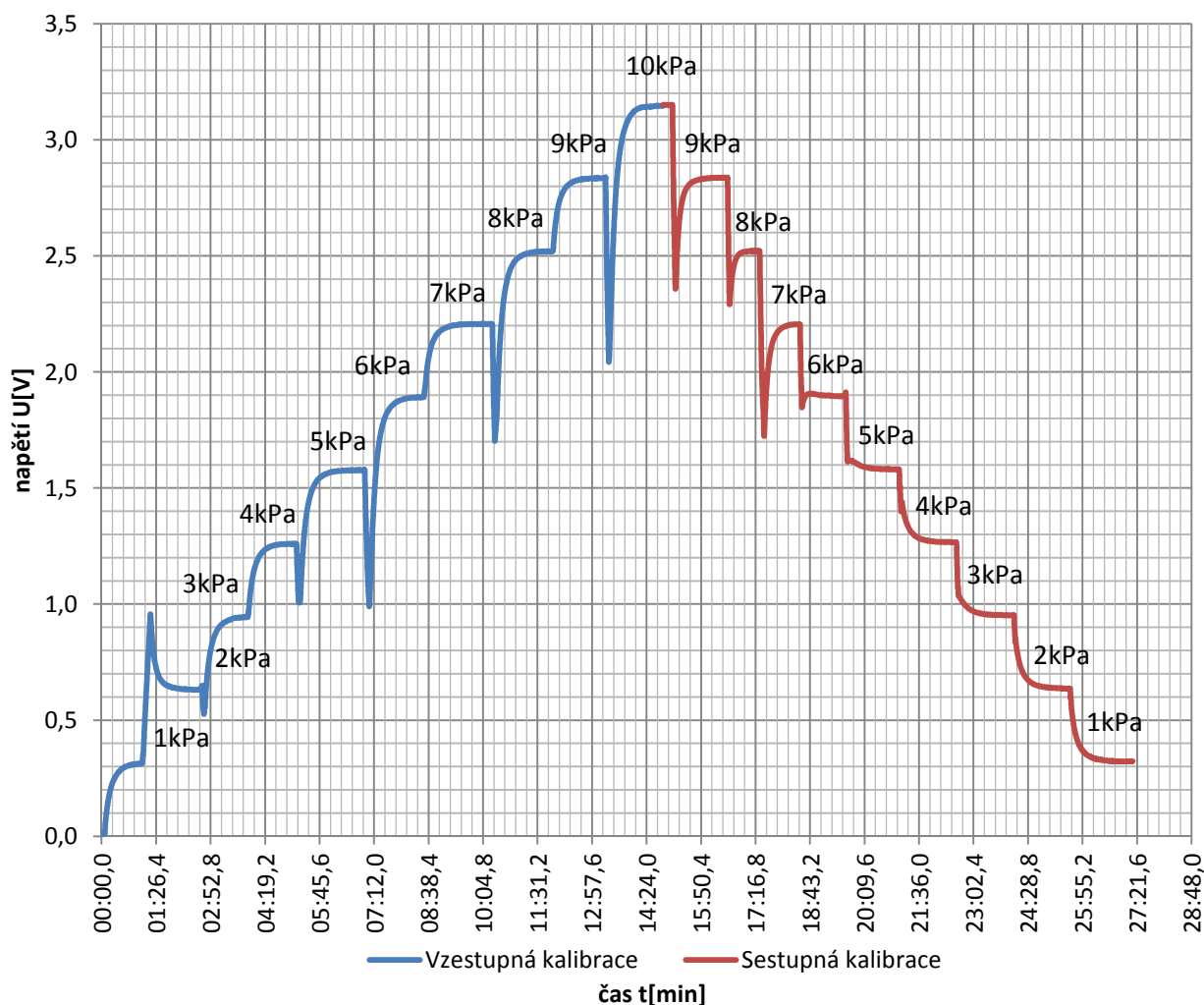
Tlak $P$ [Pa]	Napětí $U$ [V]	Diference napětí $dU$ [V]	Konstanta $K$ [V/Pa]
1000	0,32279017	0,31455931	0,00031455931
2000	0,63213153		
3000	0,94755932	0,31542779	0,00031542779
4000	1,126368319	0,31612387	0,00031612387
5000	1,57869524	0,31501205	0,00031501205
6000	1,89336136	0,31466612	0,00031466612
7000	2,20613402	0,31277267	0,00031277267
8000	2,52021602	0,31408200	0,00031408200
9000	2,83551448	0,31529845	0,00031529845
10000	3,14765145	0,31213698	0,00031213698
Průměrná přepočtová konstanta $K$ [V/Pa]			0,000331445325





**Obr. 3-13 Pracoviště na katedře KEZ, kde probíhala kalibrace zařízení**

Viditelné kladné i záporné špičkové hodnoty byly způsobeny prací s pumpou a výměnou závaží za chodu pumpy. Vždy byly průměrovány poslední čtyři sekundy vodorovného průběhu (při snímání po 0,2 sec., tzn. 20 hodnot).



**Obr. 3-14 Záznam tlakové charakteristiky během kalibrace**



### 3. Měření

Samotné měření probíhá následujícím způsobem:

Nejprve proběhne kontrola množství chladicího média, odvzdušnění čerpadla a aktivuje chladicí okruh, jehož funkci je vhodné vizuálně ověřit. Poté zapojíme datové vodiče, rozhraní USB k PC, prověříme správné načtení sběrnice do PC, a zda jsou povoleny potřebné porty. Následuje sepnutí napájecího zdroje – na obrazovce se musí v okně s grafickým vyobrazením sledované veličiny vyobrazit krátká vysoká špičková hodnota. Dalším krokem je spuštění regulátoru pece, nastavení cílových teplot a uvedení vyhřívacích okruhů pece v chod.

V programu PersonalDAQView je třeba načíst konfigurační soubor s nastavením sběrnice, periodou a počtem snímků atd. (více v kapitole 3.1.9).

Na lodičku vložíme vzorek a připravíme se na jeho vložení do pece. V programu zahájíme snímkování a jedním rychlým, plynulým pohybem vložíme vzorek a utěsníme pec.

Po uplynutí časového intervalu pro snímkování vysuneme lodičku a vysypeme spálenou formovací směs do připravené skleněné misky



***Obr. 3-15 Vyjmutí proměřeného vzorku s pece***



Je třeba dbát zvýšené opatrnosti a v průběhu měření i po něm nesahat na keramickou trubici ani na pec. Nadále je dobré si uvědomit, že materiály jsou vystavovány velkým tepelným změnám a je tedy vhodné často kontrolovat lodičku i drátový spoj.

I po uplynutí měření necháváme chladicí okruhy i regulátor pece (s vypnutým vyhříváním pece) aktivní, dokud teplota neklesne na bezpečnou hranici. Za žádných okolností nesmíme z pece vytahovat hlavici Marsovy pece, může totiž dojít k poničení křemenné trubice vlivem rychlého ochlazení a tím vyvolanými vnitřními pnutími.

#### **4. Zpracování dat**

Naměřená data jsou ukládána ve formě textového souboru s příponou \*.txt, přičemž jeden řádek odpovídá jednomu snímku. Ten obsahuje údaj o čase, datum a hodnotu naměřenou v jednotkách napětí [V] zapsanou pro příslušný počet sledovaných kanálů (1 kanál = 1 hodnota). Pro zjednodušení a urychlení práce tato data vyjmeme a vložíme do tabulkového procesoru Excel.

K jednotlivým údajům musíme přiřadit časovou osu začínající hodnotou 0 (originální data zaznamenávají konkrétní hodnotu času např. 11:12:13). V tomto kroku je vhodné ještě eliminovat prodlevu vzniklou mezi zapnutím snímkování programu a vložením vzorku do pece. Ze všech deseti hodnot (deset měření pro jeden časový snímek) vytvoříme průměrnou hodnotu.

Z analýzy rovnice (3.3) můžeme nyní vyjádřit následující vztah:

$$P = \frac{U}{K} \quad (3.4)$$

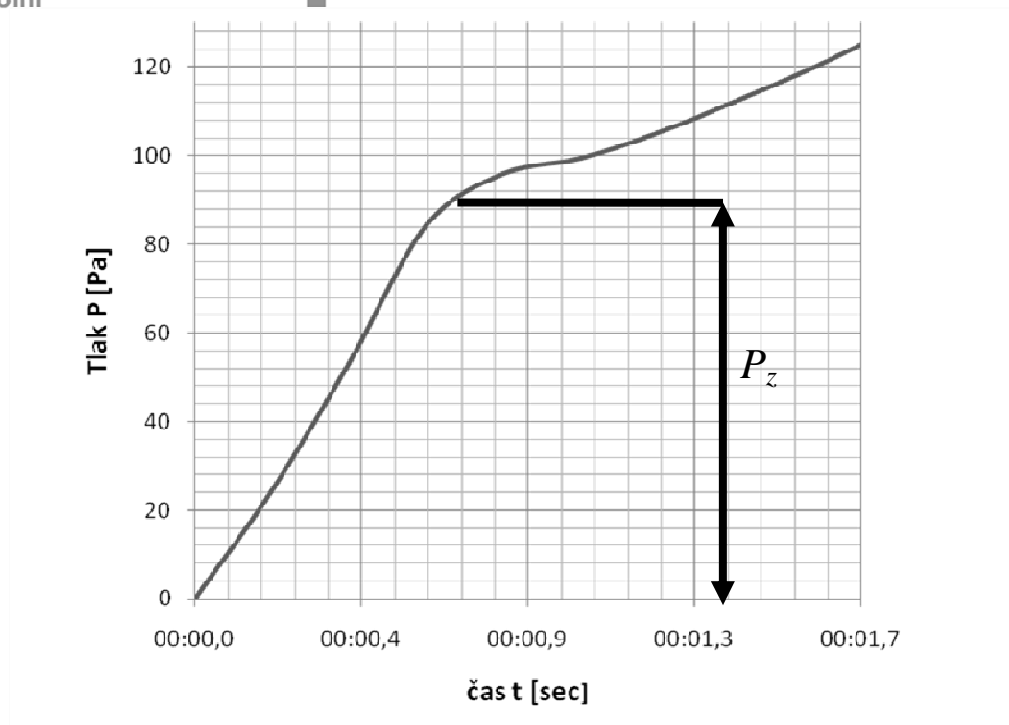
,kde je  $K$ - přepočtová konstanta [V/Pa]

$U$ - naměřené napětí [V]

$P$ – výsledný tlak v peci [Pa]

Tímto vzorcem přenásobíme hodnoty průměrných napětí a vypočteme tím tlak vyvozený rostoucím objemem plynů v peci. V tuto chvíli je již možné sestavit grafické znázornění závislosti tlaku plynů v peci na čase.





**Obr. 3-16 Chyba způsobená uzavírací zátkou**

Zde musíme provést korekci další chyby. Jak je z výseku grafu na obr. 3-16 vidět, dochází ihned na začátku měření k prudkému, krátkému a téměř lineárnímu narůstání tlaku  $P_z$ . To je způsobeno kompresí atmosféry uvnitř pece vyvolané uzavírací zátkou. Tuto hodnotu do systému vnáší lidský faktor, a proto nemůže být k opravě použita stálá konstanta ale je nutno ji vypočítat z průběhu grafu. Rozptýl této hodnoty může být redukován cvikem obsluhujícího personálu, nemůže být ale zcela zanedbána.

Po odečtení hodnoty z grafu o toto číslo ponížíme všechny výsledky měření a tím docílíme přesného, bezchybného průběhu.

Protože se výsledky měření plynatvornosti formovacích směsí vyjadřují v jednotkách objemu na 1 gram směsi, je k tomuto přepočtu třeba využít ze vztahů mezi stavovými veličinami ideálních plynů Boyleův-Mariotteův zákon vyjádřený rovnicí (3.5)

$$P * V = konst. \quad (3.5)$$

, kde  $P$  - tlak [Pa]

$V$  – objem [ $m^3$ ]



Úpravou tohoto vztahu lze docílit rovnice (3.7)

$$P_a * \Delta V = \Delta P * V_0 \quad (3.6)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta P * V_0}{P_a} \quad (3.7)$$

, kde  $P_a$  - atmosférický tlak [Pa]

$V_0$  – objem měřicí soustavy [ $\text{cm}^3$ ]

$\Delta P$  – změna tlaku vyvolaná vyvíjenými plyny uvnitř měřicí soustavy [Pa]

$\Delta V$  – změna objemu plynu vyvinutých uvnitř měřicí soustavy [ $\text{cm}^3$ ]

Za atmosférický tlak  $P_a$  lze v místě měření považovat hodnotu 97 000 Pa, jak píše MACHUTA [6]. Objemem sestavy myslíme objem tvořený expanzní nádobou, křemennou trubicí Marsovy pece a propojovací hadicí. Z kapitoly 3.1.1.1 víme, že objem křemenné trubice Marsovy pece je  $V_{\text{pec}} = 55 \text{ cm}^3$  a z kapitoly 3.1.1.7, že objem expanzní nádoby je  $V_{\text{nádoba}} = 1968 \text{ cm}^3$ . Zbývá tedy určit objem propojovací hadice, který určíme početně. Hadice je vnitřního  $vD = 6 \text{ mm}$  a délky  $L = 500 \text{ mm}$ . Osazení pro navlečení trubice mají  $L_1 = 13 \text{ mm}$  u hlavice pece a  $L_2 = 22 \text{ mm}$  na expanzní nádobce. Výsledný objem tedy vypočteme dle vzorce (3.8)

$$V_{\text{hadice}} = \frac{\pi * D^2}{4} * (L - L_1 - L_2) \quad (3.8)$$

$$V_{\text{hadice}} = \frac{\pi * 0,6^2}{4} * (50 - 1,3 - 2,2) \quad (3.9)$$

$$V_{\text{hadice}} = 13.1 [\text{cm}^3] \quad (3.10)$$

Po sečtení všech objemů tvořících měřicí soustavu vychází hodnota 2036,1  $\text{cm}^3$ .

Pomocí vztahu 3.7 určíme matematicky průběh objemu v peci vyvinutých plynů pro celé měření a sestrojíme příslušné grafy.





### 3.3 Charakteristika měřených vzorků

V průběhu této bakalářské práce jsme byli požádáni o proměření dvou typů vzorků. Šlo o odlišné metody pojivových systémů, z nichž jeden byl tvořen pomocí bentonitových pojiv, druhý metodou Cold-Box.

#### 1. Jádru C 1/8 BB3 125.

Toto jádro bylo dodáno společností SAINT-GOBAIN PAM CZ s.r.o. Jádro je tvořeno pomocí technologie Cold-Box s použitím slévárenského písku sp PR-33 (v příloze č. 2 je přiložen atest), pryskyřičnou komponentou ASCOCURE 388 a aktivátorem ASCOCURE 688. Pro výrobu směsi tohoto jádra byl užitý poměr 0,55% pryskyřice a 0,72% aktivátoru. Tento pojivový systém (více v kapitole 2.2.2) je vhodný pro litinu i ocel a vykazuje následující vlastnosti:

Vyjímací pevnost  $\geq 220$  [N/mm<sup>2</sup>]

Konečná pevnost  $\geq 540$  [N/mm<sup>2</sup>]



***Obr. 3-17 Jádru společnosti SAINT-GOBAIN PAM CZ s.r.o. rozdělené po odebrání vzorků***





## 2. Bentonitová směs

Jako další vzorek byla vybrána jednotná bentonitová směs dodaná firmou MOTOR JIKOV slévárna litiny a.s. České Budějovice. Směs obsahuje směsný bentonit typ KERIBENT C30 a směsný koncentrát SABENIL K. (přesný poměr nebyl udán). Tato formovací směs se používá pro lití tvárných a šedých litin.

## 3.4 Naměřené hodnoty plynatvornosti

Jak již bylo uvedeno výše, vzorky byly měřeny pro tři teploty, a to pro 800 °C, 1000 °C a 1200 °C po dobu 120 sec. Měření pro každou teplotu bylo provedeno 10 kvůli eliminaci chyb. To znamená, že bylo sumou provedeno přes 60 úspěšných experimentů vyjma kalibrací. V této části práce budou uvedeny pouze hodnoty po statistickém vyhodnocení. Vzhledem k velkému množství dat (přes 600 snímků na měření) jsou uvedené hodnoty pouze pro vybrané časy.

### 1. Měření pro 800 °C

V následující tabulce 3-2 jsou vyobrazeny vybrané hodnoty pro měření při 800 °C. Jsou zde uvedeny hodnoty pro okamžitý tlak i objem vyvinutých plynů.

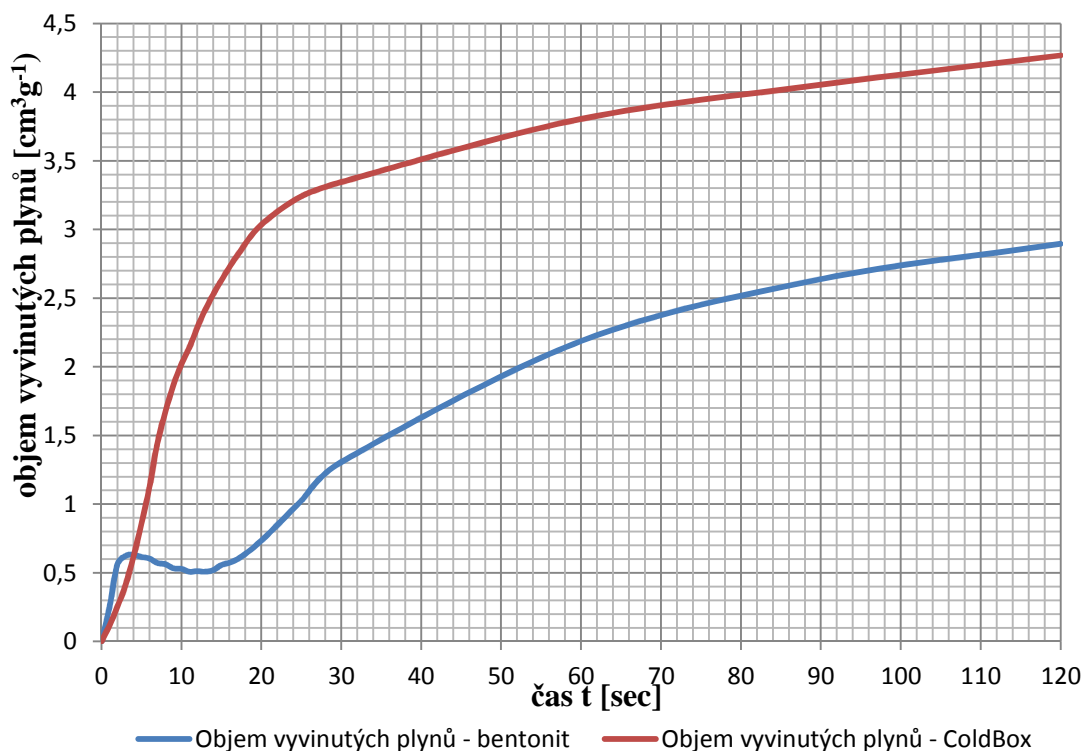
Tab. 3-2 Vybrané vyhodnocené hodnoty pro měření při 800 °C

čas t [sec]	Bentonit tlak P [Pa]	Cold-Box tlak P [Pa]	Bentonit objem V [cm <sup>3</sup> /g]	Cold-Box objem V [cm <sup>3</sup> /g]
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	11,787	5,495	0,247	0,115
2,0	26,700	12,092	0,561	0,254
3,0	29,628	19,364	0,622	0,407
4,0	30,113	29,255	0,632	0,614
5,0	29,352	40,699	0,616	0,855
6,0	28,776	53,377	0,604	1,121
7,0	27,235	68,693	0,572	1,442
8,0	26,805	79,558	0,563	1,670
9,0	25,402	88,821	0,533	1,865
10,0	25,190	96,117	0,529	2,018
11,0	24,189	101,856	0,508	2,139
12,0	24,399	108,872	0,512	2,286
13,0	24,212	115,131	0,508	2,417
14,0	24,744	120,416	0,520	2,528
15,0	26,465	125,228	0,556	2,629
17,0	28,516	133,859	0,599	2,811
20,0	34,936	144,495	0,734	3,034



25,0	48,782	154,336	1,024	3,241
30,0	62,212	159,315	1,306	3,345
60,0	104,147	181,182	2,187	3,804
90,0	125,620	193,013	2,638	4,053
120,0	137,856	203,240	2,895	4,267

Na obr. 3-18 je vyobrazen průběh závislosti objemu vyvinutých plynů na čase při 800 °C.



**Obr. 3-18 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 800 °C**

## 2. Měření pro 1000 °C

V následující tabulce 3-3 jsou uvedeny vybrané hodnoty pro měření při 1000 °C. Jsou zde uvedeny hodnoty pro okamžitý tlak i objem vyvinutých plynů.

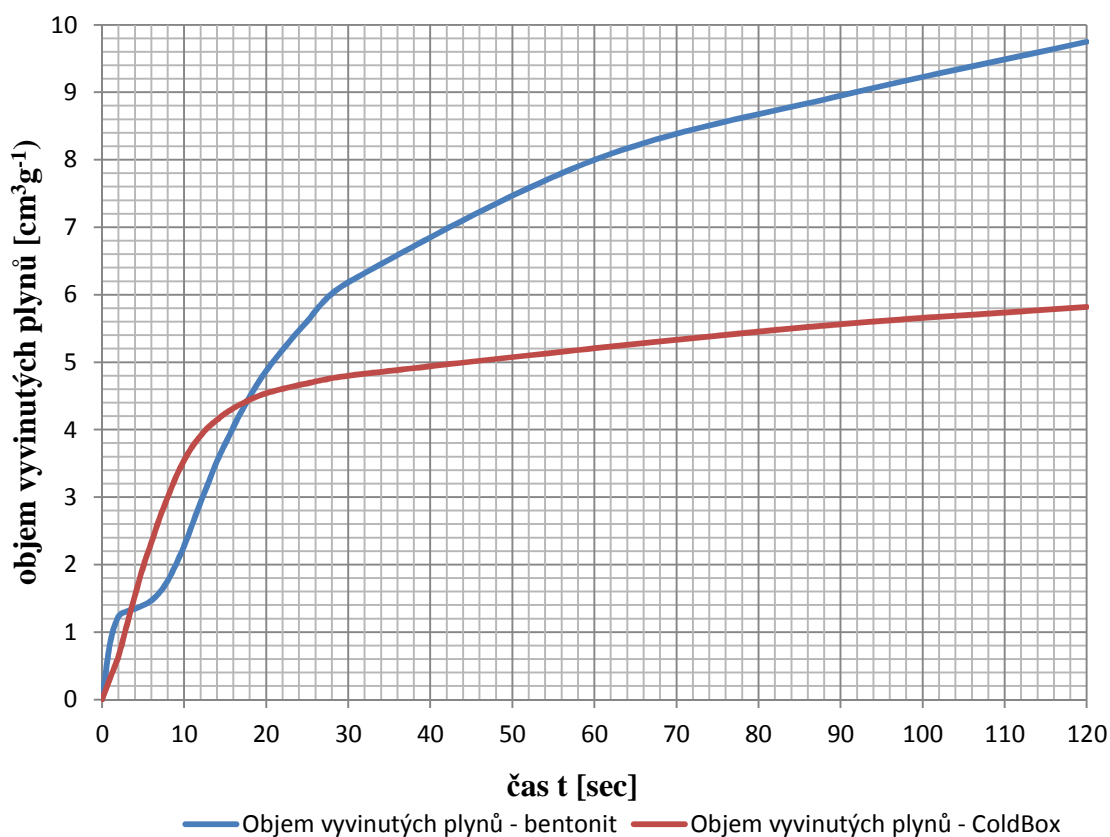


*Tab. 3-3 Vybrané vyhodnocené hodnoty pro měření při 1000 °C*

čas t [sec]	Bentonit tlak P [Pa]	Cold-Box tlak P [Pa]	Bentonit objem V [cm <sup>3</sup> /g]	Cold-Box objem V [cm <sup>3</sup> /g]
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	40,478	15,374	0,850	0,323
2,0	58,534	30,659	1,229	0,644
3,0	62,193	52,126	1,306	1,094
4,0	64,048	73,247	1,345	1,538
5,0	66,500	93,678	1,396	1,967
6,0	69,822	110,550	1,466	2,321
7,0	75,464	127,857	1,585	2,685
8,0	83,823	142,719	1,760	2,997
9,0	95,294	157,061	2,001	3,298
10,0	108,414	168,808	2,276	3,544
11,0	123,645	178,555	2,596	3,749
12,0	139,101	186,192	2,921	3,909
13,0	153,664	192,602	3,226	4,044
14,0	168,193	197,302	3,532	4,143
15,0	180,366	201,927	3,787	4,240
17,0	203,475	208,761	4,272	4,383
20,0	232,008	216,172	4,871	4,539
25,0	266,925	223,184	5,605	4,686
30,0	294,492	228,528	6,183	4,798
60,0	380,907	247,876	7,998	5,205
90,0	426,205	264,895	8,949	5,562
120,0	464,237	277,076	9,748	5,818



Na obr. 3-19 je k vidění grafické znázornění průběhu objemu vyvinutých plynů na čase při 1000 °C



**Obr. 3-19 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 1000 °C**

### 3. Měření pro 1200 °C

V následující tabulce 3-4 jsou uvedeny vybrané hodnoty pro měření při 1200 °C. Jsou zde udány hodnoty pro okamžitý tlak i objem vyvinutých plynů.

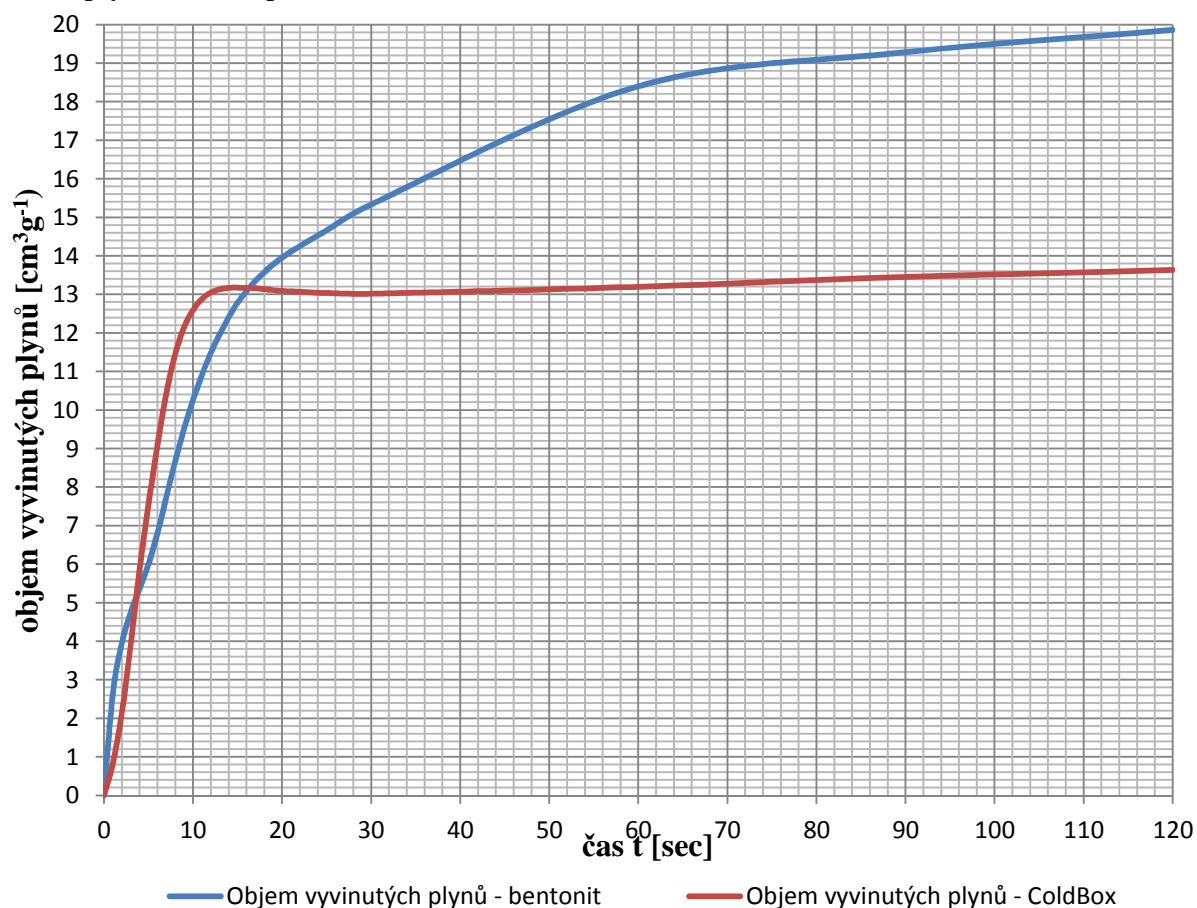


*Tab. 3-4 Vybrané vyhodnocené hodnoty pro měření při 1200 °C*

čas t[sec]	Bentonit tlak P [Pa]	Cold-Box tlak P [Pa]	Bentonit objem V [cm <sup>3</sup> /g]	Cold-Box objem V [cm <sup>3</sup> /g]
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	125,984	39,558	2,645	0,831
2,0	187,556	101,227	3,938	2,125
3,0	225,729	185,876	4,740	3,903
4,0	255,741	279,101	5,370	5,860
5,0	285,838	359,489	6,002	7,548
6,0	323,828	432,202	6,799	9,075
7,0	368,295	496,432	7,733	10,424
8,0	412,843	545,249	8,668	11,449
9,0	453,247	578,462	9,517	12,146
10,0	488,951	599,704	10,266	12,592
11,0	519,371	613,530	10,905	12,882
12,0	547,140	621,473	11,488	13,049
13,0	570,050	625,330	11,969	13,130
14,0	590,597	627,127	12,401	13,168
15,0	608,770	627,372	12,782	13,173
17,0	635,666	626,708	13,347	13,159
20,0	664,587	623,371	13,954	13,089
25,0	698,212	620,825	14,660	13,035
30,0	730,133	619,913	15,331	13,016
60,0	876,257	628,412	18,399	13,195
90,0	918,306	640,689	19,282	13,452
120,0	945,873	649,184	19,860	13,631



Na obr. 3-20 je k vidění grafické znázornění průběhu objemu vyvinutých plynů na čase při 1200 °C



***Obr. 3-20 Znázornění průběhu objemu vyvinutých plynů při 1200 °C***



## 4 Diskuze výsledků

V této bakalářské práci jsou uvedeny komplexní hodnoty plynotvornosti směsí pro pojivový systém Cold-Box obsahující pryskyřičnou komponentou ASCOCURE 388 (0,55%) a aktivátorem ASCOCURE 688 (0,72% ) dodanou firmou SAINT-GOBAIN PAM CZ s.r.o., dále pro bentonitovou formovací směs obsahující směsný bentonit typ KERIBENT C30 a směsný koncentrát SABENIL K, která byla poskytnuta firmou MOTOR JIKOV slévárna litiny a.s.

Nadále měřicí zařízení prošlo několika inovacemi upravujícími jeho resistenci vůči vnějším vlivům elektromagnetické podstaty.

Ze sledování průběhu jednotlivých měření vyplynulo, že v jakýchkoliv hodnotách nastavení teploty se projevuje vývin plynů nejvíce v prvních okamžicích, kdy vzorek vystavíme tepelnému zatížení. Poté rychlost vývinu plynů klesá a pozvolně limituje ke konečným hodnotám.

Nadále je zřejmé, že ač je rozdíl teplot mezi 800 °C a 1000 °C stejný jako mezi 1000 °C a 1200 °C, v polohách vyšších teplot je rychlost a objem vývinu plynu rapidně vyšší.

Při pozorování rozdílu mezi pevnou a sypkou směsí je třeba brát v úvahu rychlost prohřívání vzhledem ke stavu materiálu – je zřejmé, že prohřívání tuhých látek bude oproti sypkým více pozvolné. Proto je dobré nestavět výsledky plynotvornosti sypkých a tuhých materiálů do rovnosti a brát výše uvedené skutečnosti v potaz.

Nadále je vhodné přihlédnout k samotnému principu metody měření. Vzhledem k tomu, že bylo užito nepřímých metod měření, musíme počítat s nevyhovujícím tepelně-fyzikálním modelem (nebereme v potaz chemické reakce na rozhraní forma-tavenina, prodyšnost, proměnlivost teploty). To znamená, že hodnoty naměřené provozními metodami se mohou rapidně odlišovat od hodnot v této práci uvedených.

Shrnutí plynotvornosti pro jádro tvořené metodou Cold-Box jsou pro čas 120 sec následující: 800 °C – 4,267cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>; 1000 °C – 5,818cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>; 1200 °C – 13,631cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>



Pro bentonitovou směs jsme došli za dobu 120 sec k těmto hodnotám:

800 °C – 2,895 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>; 1000 °C – 9,748 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>; 1200 °C – 19,860 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>

V konečných hodnotách má jádro vytvořené metodou Cold-Box při 800 °C o 47,4% větší objem vyvinutých plynů než bentonitová směs. Při teplotě 1000 °C vykazuje oproti bentonitu o 59,7% menší objem vyvinutých plynů, při 1200 °C je to dokonce 68,6%.

Po vyhodnocení těchto výsledků jsem došel k závěru, že pro nižší teploty je výhodnější použít bentonitové směsi a od 800 °C výše směsi pro metodu Cold-Box.

Velmi podstatná část práce se zabývala konstrukčními vylepšeními a detailním rozбором měřicího zařízení. Na samotném principu měření nedošlo ke změnám ani významným úpravám. Ty se ale týkaly problematiky přenosu signálů a chladicího okruhu.

Chladicí okruh se nijak významně nepodepisuje na naměřených hodnotách, zvyšuje však životnost zařízení a snižuje ekonomické náklady. Dříve bylo chlazení realizováno napojením na vodovodní řád, což mělo v důsledku neblahý vliv na usazování vodního kamene a nečistot uvnitř hlavice Marsovy pece. Nadále se zařízení muselo před měřením vždy přemístit poblíž zdroje vody, což mohlo způsobit poškození zařízení (např. potrhané vodiče, poškození hadic atp.). Nyní je možné zařízení provozovat na destilovanou vodu takže nehrozí usazování cizích látek, není potřeba jej přemísťovat a je tedy plně autonomní. Po celou dobu funkce zařízení nedošlo k žádnému jeho výpadku či poruše chladicího okruhu. Neobjevili se ani náznaky poddimenzování výkonu chladiče při maximálních provozních teplotách pece (dlouhodobé měření v řádech hodin při 1200 °C), ani nebylo nutné spínat vrtuli ventilátoru. Lze tedy toto zařízení, když pouze méně sofistikované výroby, považovat za dostatečně výkonné k plnění současné funkce.

Problematika signálových přenosů je velice obsáhlá, lze však shrnout do několika bodů. Před konstrukčními úpravami nebylo měřicí zařízení schopné odolávat účinkům elektromagnetického zarušení především nevhodným uzemněním opletu koaxiálního vodiče a důsledkem toho bylo vnesení chyb do vlastních výsledků měření. Bohužel nelze konstatovat, na kolik byla předchozí měření chybná, protože





elektromagnetické rušení je v čase velmi nestálé a má na něj vliv velké množství proměnných.

Velikost chyby se vzhledem k uskutečněným měřením můžou v důsledku velikostí přirovnat ke kolísání tlaku uvnitř místnosti.

V příloze č. 1 je k nahlédnutí měření po sobě jdoucích průběhů s různým stupněm ochrany.

Nadále byl pokus o zapojení tepelných korekcí čidla. Bohužel se nepodařilo přes veškeré snahy vypátrat dostatečně kvalitní podklady k realizaci zapojení, a proto byly vstupy korekcí pouze přivedeny na výstup konektoru, aby nezůstaly ponechány volně.

Po seznámení se zařízením lze doporučit následující úpravy.

- 1) Zavedení dalšího tlakového čidla pro měření atmosférického tlaku, které by bylo připojeno ke sběrnici na jiném kanále. Tím bylo možné získat informace o aktuálním tlaku a o výchylnkách v místě měření, což by mělo dobrý vliv na zpřesnění měření
- 2) Zapojení tepelných korekcí čidla. To umožňuje redukovat vlivy okolní teploty na hodnoty měření a tím dochází k dalšímu zvýšení přesnosti
- 3) Eliminovat chybu lidského faktoru výběrem vhodného typu utěšňování hlavičky Marsovy pece. Tím by se dosáhlo jednotné uzavírací síly a tím i k jedné hodnotě korekce výsledků. V důsledku by to mělo dobrý vliv na chyby v hodnotách měření.
- 4) Připojit automatizační jednotku k chladicímu agregátu. Ta by realizovala nespojitou regulaci u spínání motoru. To umožňuje mít na hlavičce Marsovy pece stálou teplotu a sníží to náklady spojené s měřením plynovornosti.

Výsledkem těchto úprav by měla být minimalizace vlivu chyb na výsledné hodnoty.



## 5 Závěr

Tématem této bakalářské práce bylo posouzení plynotvornost formovacích a jádrovacích směsí. Práce jej zpracovává ve dvou nejdůležitějších částech. V teoretické části proběhl základní rozbor formovacích či jádrovacích směsí v jejich základních složkách. Tím dává jakousi úvodní představu o materiálech a technologiích dnes běžně v praxi užívaných. Nadále se rešeršní část zabývala vývinem plynů uvnitř formovací směsi během lití kovů a jeho dopady na odlitky.

V praktické části došlo ke kompletní analýze každé části měřicího zařízení, jeho základních vlastností, proměření a zaznamenání důležitých hodnot, které se dochovávaly pouze v neúplné podobě. Nadále proběhla inovace datových svazků a vytvoření uzavřeného chladicího okruhu.

Poté proběhla na inovovaném zařízení série měření zahrnujících 2 formovací směsi. Poznatky nabyté v průběhu řešení lze shrnout do několika bodů:

- 1) Chladicí okruh se dá označit za předdimenzovaný. Za celou dobu měření i při vysokých teplotách končících na 1200 °C se hlavice Marsovy pece neohřála na více než 40 °C. To je mezní pocitová hodnota, od které již neudržíme na zařízení ruku. Po celou dobu měření nedošlo k jedinému výpadku čerpadla, proto lze zařízení prohlásit za spolehlivé.
- 2) Nově instalovaný datový svazek redukuje chybu měření blížící se až k  $1\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}$ . Tato hodnota však není stálá a může se pohybovat i ve vyšších sférách (výpočet chyby uveden v příloze č. 1).
- 3) Nejvyšší naměřená hodnota plynotvornost byla  $19,860\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}$ , a to při měření bentonitových směsí za teploty 1200 °C.
- 4) Nejnižší hodnoty plynotvornosti byly naměřeny na teplotě 800 °C při měření bentonitové směsi – a to  $2,895\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}$
- 5) Měřicí zařízení velmi přesně registruje a vykresluje průběhy plynotvornosti. Data jsou tříděna a zpracována dle navrženého postupu. I když bentonitové směsi vykazovaly stále rostoucí průběh bez limitních tendencí, po uplynuté době 120 sec lze již považovat povrch odlitku



za natolik ztuhlý, že nadále nebude docházet k narušování povrchu odlitku bublinami.

Z důvodu, že se jedná o základní výzkum, a nebyly výsledky plynotvornosti aplikovány v praxi, není proveden ekonomický přínos této práce



## Seznam použité literatury

- [1] NOVÁ, I. *Teorie slévání I. díl*. Liberec: FS-KSP, TU v Liberci, 2007.
- [2] JELÍNEK, P. *Slévárenství*. 5. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská v Ostravě, 2010.
- [3] SLOVÁK, S., RUSÍN, K. *Teorie slévání*. Praha: SNTL, 1990.
- [4] BLAŠČÍK, F. a kol. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania*. Praha: Alfa a SNTL, 1988.
- [5] ODLOŽIL, J. *Slévárenské písky a jejich vlastnosti*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT.
- [6] MACHUTA, J. *Posouzení plynatosti vybraných formovacích směsí*. Liberec, 2007. Diplomová práce. TUL.
- [7] JELÍNEK, P. *Slévárenské formovací směsi – II. část, pojivové soustavy formovacích směsí*. Ostrava: Vysoká škola Báňská v Ostravě, 1996.
- [8] JENČOVSKÝ, M. *Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi*. Liberec, 2006. Bakalářská práce. TUL.
- [9] KOČÍ, D. *Posouzení plynatosti vybraných formovacích a jádrovacích směsí*. Liberec, 2008. Diplomová práce. TUL.
- [10] OMEGA OMM-DAQ-54/55/56 *Personal Daq User's Manual* [online]. 172 s.  
[cit. 2013-04-20] Dostupné z:  
<http://www.omega.com/Manuals/manualpdf/M3174.pdf>
- [11] *Datasheet OMEGA PXM02MC 0-160mBAR* [online]. 2 s. [cit. 2013-04-20]  
Dostupné z: <http://www.omega.co.uk/Pressure/pdf/PXM02-i.pdf>
- [12] CUPÁK, P. *Zkoumání možností použití biogenních látek jako pojiv slévárenských jádrových směsí*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT.
- [13] KALOUSEK, J., KALOUSKOVÁ, G., HOLUBEC, Z. *Fyzikální chemie metalurgických procesů*. Liberec: VŠST Liberec, 1990.
- [14] PETRŽALA, L. *Slévárenské formovací látky*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1955.



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Schéma polymorfních modifikací křemene. [1]</i>	10
<i>Obr. 2-2 Závislost tepelné dilatace na teplotě [1]</i>	11
<i>Obr. 3-1 Hlavní části měřicího zařízení pro stanovení plynotvornosti na KSP</i>	33
<i>Obr. 3-2 Pohled na zařízení Marsovy pece</i>	34
<i>Obr. 3-3 Napájecí zdroj čidla</i>	35
<i>Obr. 3-4 Regulátor Marsovy pece</i>	36
<i>Obr. 3-5 Chladicí aparát zkonstruovaný na KSP</i>	37
<i>Obr. 3-6 Datová sběrnice OMB-DAQ-56</i>	38
<i>Obr. 3-7 Sestava propojovacích datových svazků</i>	40
<i>Obr. 3-8 Čidlo OMEGA PXM02MC 0-160mBAR s konektorem CAN 15</i>	41
<i>Obr. 3-9 Expanzní nádoba</i>	42
<i>Obr. 3-10 Uzavírací zátka s lodičkou</i>	42
<i>Obr. 3-11 Váha RADWAG W/S 4000/C/2</i>	44
<i>Obr. 3-12 Kalibrační křivka</i>	46
<i>Obr. 3-13 Pracoviště na katedře KEZ, kde probíhala kalibrace zařízení</i>	47
<i>Obr. 3-14 Záznam tlakové charakteristiky během kalibrace</i>	47
<i>Obr. 3-15 Vyjmutí proměřeného vzorku s pece</i>	48
<i>Obr. 3-16 Chyba způsobená uzavírací zátkou</i>	50
<i>Obr. 3-17 Jádru společnosti SAINT-GOBAIN PAM CZ s.r.o. rozdělené po odebrání vzorků</i>	52
<i>Obr. 3-18 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 800 °C</i>	54
<i>Obr. 3-19 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 1000 °C</i>	56
<i>Obr. 3-20 Znárodnění průběhu objemu vyvinutých plynů při 1200 °C</i>	58



## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Výroba a zapojení propojovacích kabelů

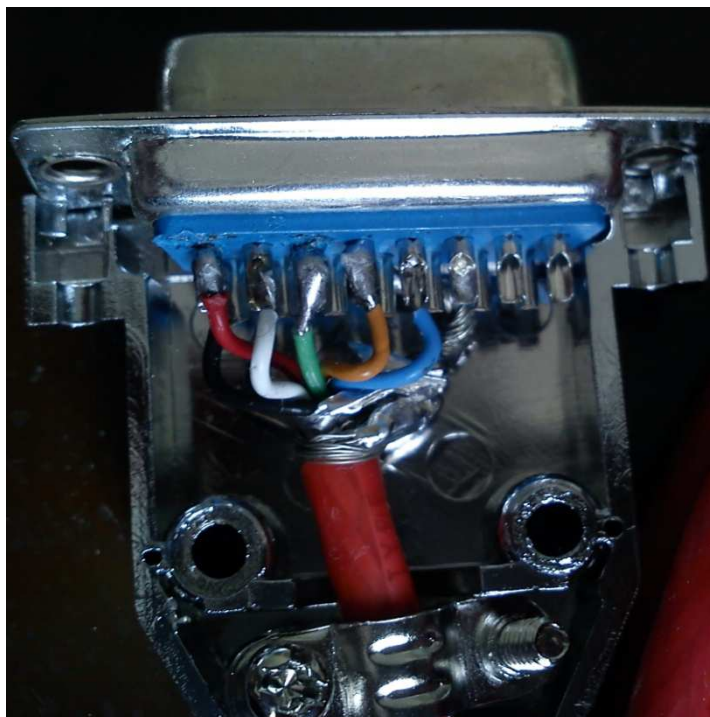
Příloha č. 2 – Granulometrická skladba ostřiva



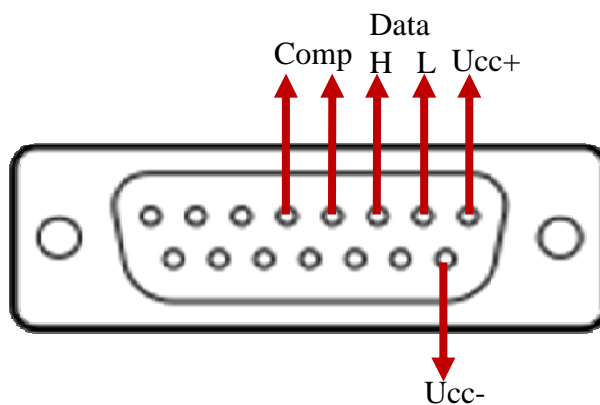
# PŘÍLOHY

## Příloha č. 1 – Výroba a zapojení propojovacích kabelů

### A) Zapojení konektoru tlakového snímače



*Konektor osazen na koaxiálním vodiči čidla OMEGA PXM02MC 0-160mBAR*



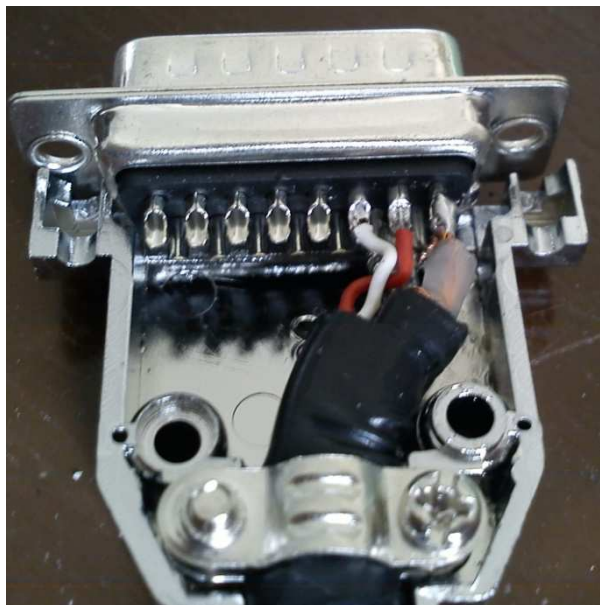
Comp. – vodiče kompenzace, Data – datové vodiče (H a L značí připojení na svorkovnici sběrnice), Ucc+ - kladný pól napájení, Ucc- - záporný pól napájení a uzemnění

*Schematické znázornění připojení pinů na koaxiálním vodiči čidla OMEGA PXM02MC 0-160mBAR*

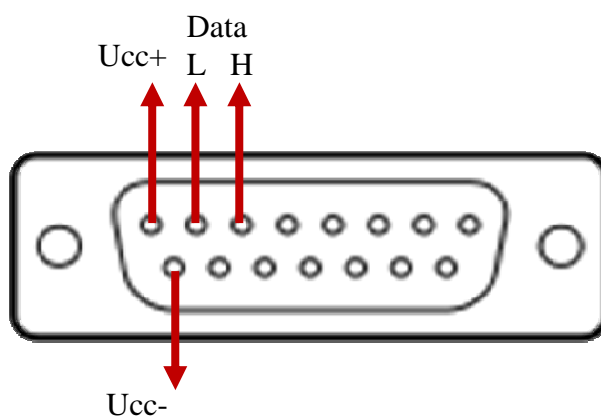


## Pokračování – Příloha č. 1

B) Zapojení konektoru na přechodu datový svazek – snímač tlaku



*Konektor osazen na datovém svazku připojován na rozhraní čidlo – datový svazek*

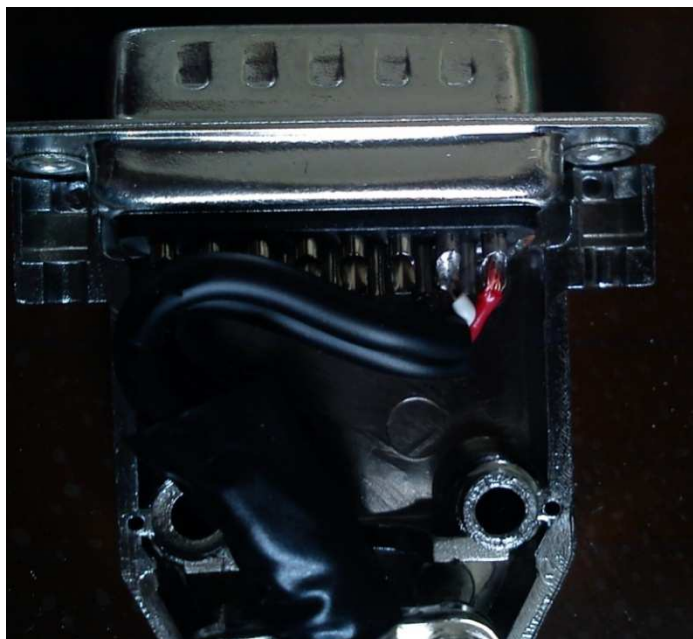


Comp. – vodiče kompenzace, Data – datové vodiče (H a L značí připojení na svorkovnici sběrnice), Ucc+ - kladný pól napájení, Ucc- - záporný pól napájení a uzemnění

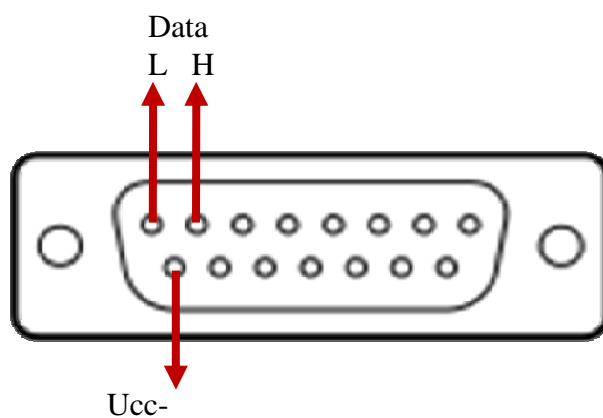
*Schematické znázornění připojení pinů konektoru na rozhraní čidlo – datový svazek*

## Pokračování – Příloha č. 1

C) Zapojení konektoru na přechodu datový svazek - sběrnice



*Konektor osazen na datovém svazku připojován na rozhraní datový svazek - sběrnice*

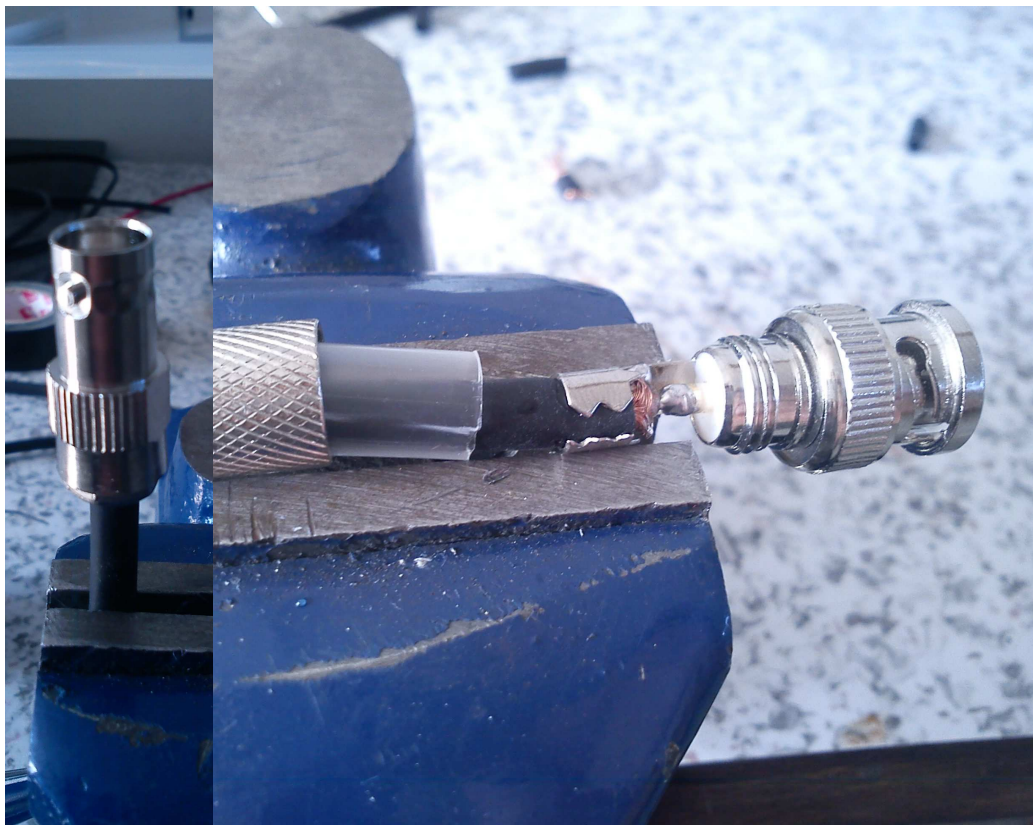


Data – datové vodiče (H a L značí připojení na svorkovnici sběrnice,  
Ucc- - uzemnění

*Schematické znázornění připojení pinů na rozhraní datový svazek - sběrnice*

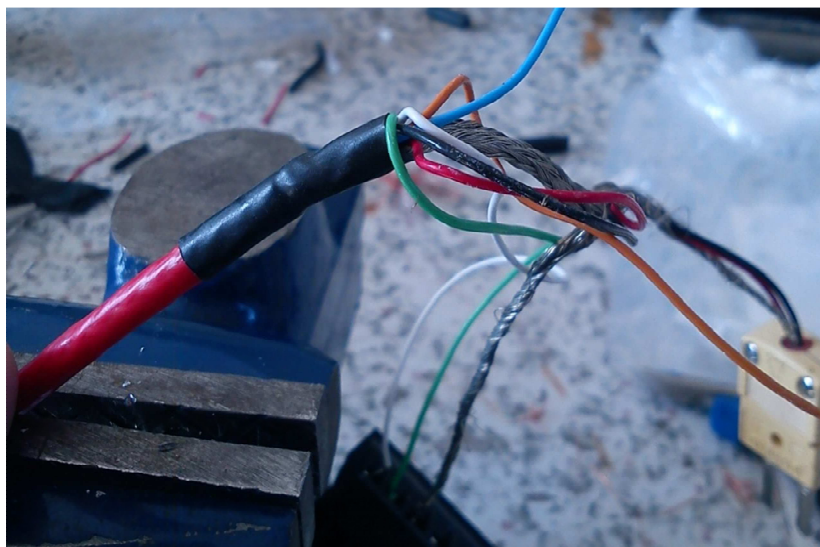
## Pokračování – Příloha č. 1

### D) BNC konektory napájení s koaxiálním vodičem



*Konektory BNC sloužící k připojení napájecího zdroje čidla do datového svazku*

Vlevo se nachází konektor umístěný na výstupu napájecího zdroje čidla, napravo konektor naletovaný na datovém svazku. Napájení  $U_{cc+}$  je vedeno v ose koaxiálního kabelu, na oplet je připojeno  $U_{cc-}$  sloužící zároveň jako uzemnění.



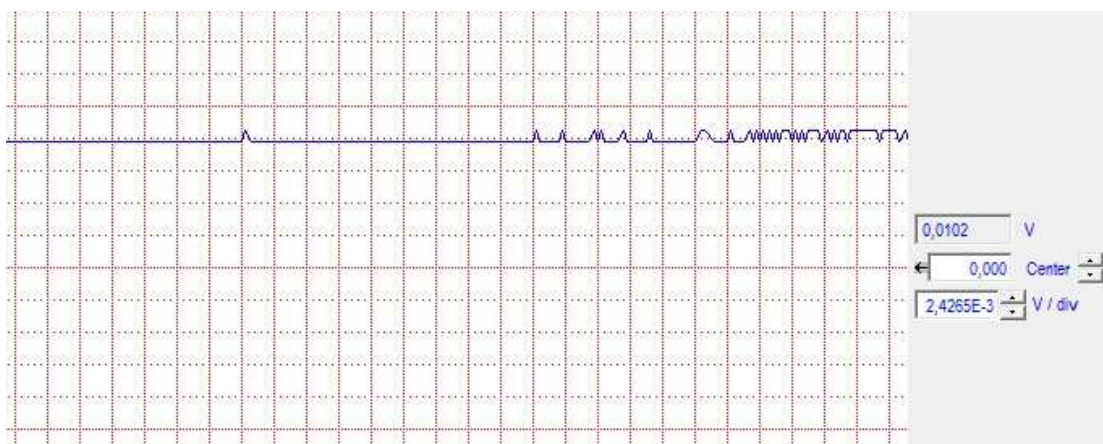
*Fotografie zobrazující původní stav*

## Pokračování – Příloha č. 1

Na následujících grafech je vidět stav před a po instalaci datových svazků.



*Grafické vyobrazení signálu při hermeticky uzavřené expanzní nádobě před montáží datového svazku.*



*Grafické vyobrazení signálu při hermeticky uzavřené expanzní nádobě po montáží datového svazku*

## **Pokračování – Příloha č. 1**

Na předchozí straně nahoře je uveden stav bez montáže datových svazků a níže je uveden stav po montáži. Je zde nutno zdůraznit, že oba grafy byly tvořeny při stejných měřítkách, jejichž rozsah je viditelný vpravo (jde o hodnotu přibližně 0,002264V/dílek).

To znamená, že absolutní chyba (odečtena ze zakroužkované oblasti grafu před montáží datových svazků) napětí může být mimo extrémní špičky až 0,013584 V (6 dílků po 0,002264V ). Po dosazení do rovnice 3.4 vyjde hodnota chybového tlaku 40,98 [Pa]. Po dosazení hodnoty chybového tlaku do rovnice 3.7 vyjde chybný objem vyvinutých plynů  $0,86 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . Je důležité poznamenat, že tato chyba je v čase velmi nestálá a měl na ni vliv veškerých elektromagnetických spotřebičů uvnitř místnosti, ve které měření probíhala.

Kolísavé hodnoty na grafu po montáži datových svazků patrně způsobila hraniční hodnota spojitého signálu, při které se AD převodník překlápí o jeden bit.



## Příloha č. 2 – Granulometrická skladba ostřiva

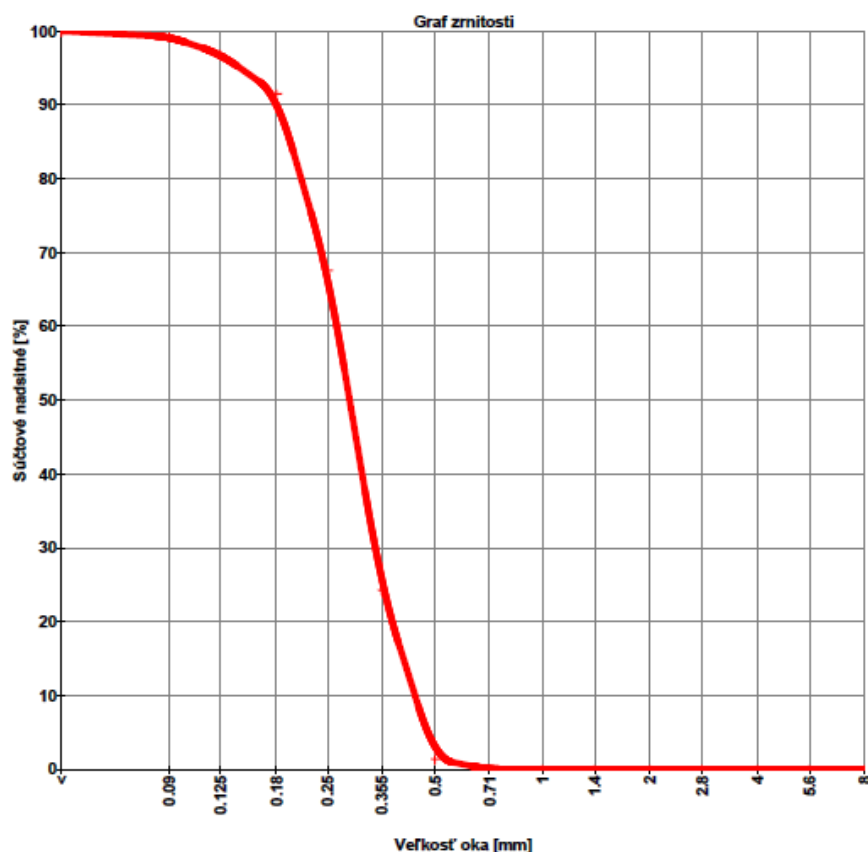
Provodínské písky a.s.

9:58:06 27.3.2012

<b>Atest nespecifický / Zkušební zpráva "2.2" (ČSN EN 10204)</b>				Id.vzorku: <b>157860</b>	
Místo: <b>S13</b>	<b>6.1-S13</b>	<b>Silo S13</b>	<b>250 t - sušený</b>	Dát.kontroly: <b>26.03.2012</b>	
Produkt: <b>sp PR 33</b>		<b>písek sušený</b>	<b>slévárenský</b>	Čas: <b>09:00</b>	
Dávka:				Zmena: <b>1</b>	
Char: <b>SU-P</b>	<b>SU-produkty</b>	<b>kontrola</b>		Dát.výroby: <b>26.03.2012</b>	
Id1, Dat1:		Id3, Dat3:		Vypracoval: <b>VESELA</b>	
Id2, Dat2:		Id4, Dat4:			
Poznámka:					

Tabuľka sitového rozboru		
Veľkosť oka[mm]	Obsah frakcií [%]	Súčtové nadsitné [%]
8	0.00	0.00
5.6	0.00	0.00
4	0.00	0.00
2.8	0.00	0.00
2	0.00	0.00
1.4	0.00	0.00
1	0.00	0.00
0.71	0.00	0.00
0.5	1.39	1.39
0.355	22.89	24.27
0.25	43.32	67.59
0.18	23.91	91.51
0.125	5.34	96.85
0.09	2.38	99.23
<	0.77	100.00

Ďalšie parametre			
D10[mm]	0.184	Vlhkosť%	0.070
D25[mm]	0.353		
D50[mm]	0.288		
D60[mm]	0.313		
D75[mm]	0.226		
D60/D10	1.701		
D75/D25[%]	63.986		
Sth[cm2/g]	86.901		
AFS[cm2/g]	49.533		
MK[mm]	0.295		



*Atest přiložený k ostřivu užitém při výrobě jádra fy. SAINT-GOBAIN PAM CZ  
s.r.o.*